

NOBIS 97-1-06  
PROCESMONITORING VAN BODEMLUCHT-  
VENTILATIE ONDER GECONDITONEERDE  
OMSTANDIGHEDEN OP SEMI-VELDSCHAAL

Een grootschalige onderzoeksfaciliteit voor bio-  
logische in situ bodemreiniging

dr.ir. J.A. de Vos (Plant Research International)  
dr.ir. A.L. Smit (Plant Research International)  
dr.ir. J.T.C. Grotenhuis (Wageningen Universiteit, Milieutechnologie)  
dr. C. Rappoldt (Plant Research International)

februari 2000

Gouda, CUR/NOBIS

### **Auteursrechten**

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze opgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van CUR/NOBIS.

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Procesmonitoring van bodemluchtventilatie onder geconditioneerde omstandigheden op semi-veldschaal - Een grootschalige onderzoeksfaciliteit voor biologische in situ bodemreiniging", februari 2000, CUR/NOBIS, Gouda."

### **Aansprakelijkheid**

CUR/NOBIS en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze uitgave. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat er toch fouten en onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker en CUR/NOBIS sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade mocht voortvloeien uit opzet of grove schuld zijdens CUR/NOBIS en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

### **Copyrights**

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording and/or otherwise, without the prior written permission of CUR/NOBIS.

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©"Process monitoring of bioventing under controlled conditions at semi-field scale - A large-scale research facility for biological in situ soil remediation", February 2000, CUR/NOBIS, Gouda, The Netherlands."

### **Liability**

CUR/NOBIS and all contributors to this publication have taken every possible care by the preparation of this publication. However, it can not be guaranteed that this publication is complete and/or free of faults. The use of this publication and data from this publication is entirely for the user's own risk and CUR/NOBIS hereby excludes any and all liability for any and all damage which may result from the use of this publication or data from this publication, except insofar as this damage is a result of intentional fault or gross negligence of CUR/NOBIS and/or the contributors.

**Titel rapport**

Procesmonitoring van bodemluchtventilatie onder geconditioneerde omstandigheden op semi-veldschaal  
Een grootschalige onderzoeksfaciliteit voor biologische in situ bodemreiniging

**CUR/NOBIS rapportnummer**

97-1-06

**Project rapportnummer**

97-1-06

---

**Auteur(s)**

dr.ir. J.A. de Vos  
dr.ir. A.L. Smit  
dr.ir. J.T.C. Grotenhuis  
dr. C. Rappoldt

**Aantal bladzijden**

**Rapport:** 19  
**Bijlagen:** 17

---

**Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)**

Plant Research International (dr.ir. A.L. Smit, 0317-475701)  
Wageningen Universiteit, Milieutechnologie (dr.ir. J.T.C. Grotenhuis, 0317-483339)

---

**Uitgever**

CUR/NOBIS, Gouda

---

**Samenvatting**

Voor- en nadelen van een grootschalige onderzoeksfaciliteit voor in situ bodemreiniging worden in dit rapport beschreven. De belangrijkste biologische, fysische en chemische processen zijn beschreven en experimenten op diverse schaalniveaus zijn geëvalueerd. Bestaande grootschalige faciliteiten in Nederland zijn geïnventariseerd. Het VEGAS-project (Duitsland) heeft in Europa de grootste en modernste onderzoeksfaciliteiten. Grootschalige onderzoeksfaciliteiten bieden goede mogelijkheden om geïntegreerde biologische, fysische en chemische modellen te evalueren. Potenties van nieuwe saneringsmaatregelen en nieuwe sensoren kunnen goed worden getest in bestaande faciliteiten in Nederland. In Nederland is het Rhizolab van Plant Research International de meest bruikbare faciliteit, gezien de afmetingen, meetapparatuur en voorzieningen. De VEGAS-faciliteit kan worden gebruikt als experimenten op nog grotere schaal noodzakelijk zijn. Er zijn grote financiële, technische en organisatorische inspanningen nodig om een nieuwe grootschalige faciliteit in Nederland te realiseren. Het is praktischer om van bestaande grootschalige faciliteiten gebruik te maken. Voorgesteld wordt om een platform op te richten dat zorg draagt voor een goede coördinatie van deze faciliteiten.

---

**Trefwoorden****Gecontroleerde termen:**

bodemprofiel, bodemsanering, experimenten, modellen, onderzoek

**Vrije trefwoorden:**

bodemprocessen, grootschalig, meetapparatuur, modelontwikkeling, onderzoeksfaciliteit

---

**Titel project**

Procesmonitoring van bodemluchtventilatie onder geconditioneerde omstandigheden op semi-veldschaal

**Projectleiding**

Plant Research International  
(dr.ir. A.L. Smit, 0317-475701)

---

Dit rapport is verkrijgbaar bij:  
CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

**Report title**

Process monitoring of bioventing under controlled conditions at semi-field scale  
A large-scale research facility for biological in situ soil remediation

**CUR/NOBIS report number**

97-1-06

**Project report number**

97-1-06

---

**Author(s)**

dr.ir. J.A. de Vos  
dr.ir. A.L. Smit  
dr.ir. J.T.C. Grotenhuis  
dr. C. Rappoldt

**Number of pages**

**Report:** 19

**Appendices:** 17

---

**Executive organisation(s) (Consortium)**

Plant Research International (dr.ir. A.L. Smit, 0317-475701)  
Wageningen Universiteit, Milieutechnologie (dr.ir. J.T.C. Grotenhuis, 0317-483339)

---

**Publisher**

CUR/NOBIS, Gouda

---

**Abstract**

Advantages and disadvantages of large-scale facilities for in situ soil remediation are discussed. The most relevant biological, physical and chemical processes are described and experiments at different scales are evaluated. An overview is made of existing large-scale facilities in The Netherlands. The VEGAS-project (Germany) has the largest and most modern research facility in Europe. Large-scale facilities have the potential of evaluating integrated biological, physical and chemical models. New remediation techniques and sensors can be tested well in existing facilities in the Netherlands. Due to its dimensions, instruments and facilities, the Rhizotron of Plant Research International is the most suitable large-scale facility in The Netherlands. The VEGAS-facility can be used when experiments at a larger scale are necessary. Large financial, technical and organizational efforts would be needed to realize a new large-scale facility. It is more practical to use the existing large-scale facilities. It is proposed to establish a platform to co-ordinate these facilities.

---

**Keywords****Controlled terms:**

experiments, models, research, soil profile, soil remediation

**Uncontrolled terms:**

large-scale, measuring devices, model development, research facility, soil processes

---

**Project title**

Process monitoring of bioventing under controlled conditions at semi-field scale

**Projectmanagement**

Plant Research International  
(dr.ir. A.L. Smit, 0317-475701)

---

This report can be obtained by: CUR/NOBIS, PO Box 420, 2800 AK Gouda, The Netherlands  
Dutch Research Programme In-Situ Bioremediation (NOBIS)

## VOORWOORD

Dit rapport is een onderdeel van het NOBIS-project 97-1-06. Het doel van dit project is te inventariseren wat de voor- en nadelen zijn van een grootschalige onderzoeksfaciliteit voor het oplossen van problemen met betrekking tot biologische in situ bodemreiniging. Dit rapport is gebaseerd op de aanwezige kennis en ervaring bij de auteurs, literatuuronderzoek, bezoeken aan onderzoekers bij reeds bestaande grootschalige faciliteiten in Nederland en Duitsland, en interactie met de begeleidingscommissie van dit project (zie bijlage A).

In het rapport wordt zowel aan de verzadigde als de onverzadigde zone van de bodem aandacht geschonken. Er is gekozen voor een algemene benadering, waarbij eerst de belangrijkste processen worden besproken en vervolgens de implicaties van de verschillende schaalgrootten worden geanalyseerd, in plaats van een benadering waarbij voor elk specifiek probleem of specifieke reinigingstechniek naar een relevante schaal is gezocht.

In de loop van het project is duidelijk geworden dat bij een grootschalige onderzoeksfaciliteit, naast de experimentele en organisatorische voorzieningen, ook het ontwikkelen en evalueren van modellen essentieel is. Het inventariseren van bestaande modellen was geen onderdeel van het project, maar toch is een poging gedaan te illustreren welk type modellen relevant en beschikbaar zijn.

februari 2000

# INHOUD

		SAMENVATTING	vi
		SUMMARY	vii
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
Hoofdstuk	2	PROCESSEN BIJ BIOLOGISCHE BODEMREINIGING	3
	2.1	Biologische afbraakprocessen	3
	2.2	Waterstroming in de verzadigde en onverzadigde zone	3
	2.3	Convectief stoffentransport	3
	2.4	Gastransport in de onverzadigde zone	4
	2.5	Biogeochemische reacties en uitwisseling	4
	2.6	Plantengroei	5
	2.7	Technieken om het afbraakproces te versnellen	6
Hoofdstuk	3	EXPERIMENTEN OP VERSCHILLENDE SCHALEN	7
	3.1	Batchexperimenten	7
	3.2	Kolomexperimenten	7
	3.3	Lysimeterexperimenten	7
	3.4	Experimenten in een grootschalige onderzoeksfaciliteit	8
	3.5	Veldproeven	8
	3.6	Opschaling	8
Hoofdstuk	4	MODELLEN OP VERSCHILLENDE SCHALEN	10
Hoofdstuk	5	BESTAANDE GROOTSCHALIGE ONDERZOEKSFACILITEITEN	11
	5.1	Bestaande onderzoeksfaciliteiten in Nederland	11
	5.1.1	Doelstellingen	11
	5.1.2	Schaalgrootte	11
	5.1.3	Management van grootschalige onderzoeksfaciliteiten	12
	5.2	Grootschalige onderzoeksfaciliteiten in het buitenland	12
	5.2.1	VEGAS-project (Stuttgart, Duitsland)	12
	5.2.2	IFARE (Frankrijk) en Waterloo (Canada)	13
Hoofdstuk	6	MOGELIJKHEDEN VAN EEN GROOTSCHALIGE ONDERZOEKSFACILITEIT	14
Hoofdstuk	7	CONCLUSIES	16
		LITERATUUR	18
Bijlage	A	SAMENSTELLING VAN DE BEGELEIDINGSCOMMISSIE	
Bijlage	B	RELEVANTE PROCESSEN MET BETREKKING TOT FYTO-REMIEDIATIE	
Bijlage	C	SINDERHOEVE, ALTERRA, TE RENKUM	
Bijlage	D	OOSTWAARDHOEVE/EUROJOULE TE SLOOTDORP	

Bijlage	E	WAGENINGEN RHIZOLAB, PLANT RESEARCH INTERNATIONAL
Bijlage	F	INSTITUT FRANCO-ALLEMAND DE RECHERCHE SUR L'ENVIRONNEMENT
Bijlage	G	ARCADIS LANDFARMING
Bijlage	H	GEODELFT
Bijlage	I	VRIJE UNIVERSITEIT AMSTERDAM

## SAMENVATTING

### **Procesmonitoring van bodemluchtventilatie onder geconditioneerde omstandigheden op semi-veldschaal**

Voor- en nadelen van een grootschalige onderzoeksfaciliteit voor in situ bodemreiniging worden in dit rapport beschreven. De belangrijkste biologische, fysische en chemische processen zijn beschreven en experimenten op diverse schaalniveaus zijn geëvalueerd. Bestaande grootschalige faciliteiten in Nederland zijn geïnventariseerd. Het VEGAS-project (Duitsland) heeft in Europa de grootste en modernste onderzoeksfaciliteiten. Grootschalige onderzoeksfaciliteiten bieden goede mogelijkheden om geïntegreerde biologische, fysische en chemische modellen te evalueren. Potenties van nieuwe saneringsmaatregelen en nieuwe sensoren kunnen worden getest. In Nederland is het Rhizolab van Plant Research International de meest bruikbare faciliteit, gezien de afmetingen, meetapparatuur en voorzieningen. De VEGAS-faciliteit kan worden gebruikt als experimenten op nog grotere schaal noodzakelijk zijn. Er zijn grote financiële, technische en organisatorische inspanningen nodig om een nieuwe grootschalige faciliteit in Nederland te realiseren. Het is praktischer om van bestaande grootschalige faciliteiten gebruik te maken. Voorgesteld wordt om een platform op te richten dat zorg draagt voor een goede coördinatie van deze faciliteiten.



## SUMMARY

### **Process monitoring of bioventing under controlled conditions at semi-field scale**

Advantages and disadvantages of large-scale facilities for in situ soil remediation are discussed. The most relevant biological, physical and chemical processes are described and experiments at different scales are evaluated. An overview is made of existing large-scale facilities in The Netherlands. The VEGAS-project (Germany) has the largest and most modern research facility in Europe. Large-scale facilities have the potential of evaluating integrated biological, physical and chemical models. New remediation techniques and sensors can be tested. Due to its dimensions, instruments and facilities, the Rhizotron of Plant Research International is the most suitable large-scale facility in The Netherlands. The VEGAS-facility can be used when experiments at a larger scale are necessary. Large financial, technical and organizational efforts would be needed to realize a new large-scale facility. It is more practical to use the existing large-scale facilities. It is proposed to establish a platform to co-ordinate these facilities

## HOOFDSTUK 1

### INLEIDING

Biologische in situ reiniging is bedoeld om een verontreinigde bodem weer schoon te krijgen. Onderzoeksfaciliteiten ten behoeve van biologische in situ reiniging kunnen helpen bij het leren begrijpen van de processen, het zoeken naar methoden om de reinigingsduur te verkorten en het testen van reinigingstechnieken en meetmethoden. Een 'probleembezitter' wil graag weten hoe snel een verontreiniging tot een aanvaardbaar niveau is gereduceerd en hoe lang metingen op de locatie noodzakelijk zijn.

In eerste instantie wordt meestal een milieutechnische systeembenadering gekozen om de processen in de bodem te beschrijven, waarbij op een zo hoog mogelijk ruimtelijk schaalniveau naar relaties wordt gezocht tussen biologische afbraak en stuurvariabelen. Bij het onderzoek naar biologische bodemreiniging komt steeds de vraag aan de orde voor welk doel op welke ruimtelijke schaal zinvolle experimenten gedaan kunnen worden. Voldoen batch-, kolom- en lysimeterexperimenten; zijn nog grootschaligere experimenten nodig of moeten we naar de veldschaal. Deze vraag kan alleen worden beantwoord door de processen te beschouwen en ons vervolgens af te vragen in welk detail we nog geïnteresseerd zijn en welke rol heterogeniteit hierbij speelt.

Onder heterogeniteit wordt de ruimtelijke variatie in een eigenschap of een toestand verstaan. Eigenschappen zijn kenmerken van het systeem die niet of zeer langzaam veranderen, zoals de minerale samenstelling of hydraulische eigenschappen van de bodem. Toestanden zijn momentopnamen van de situatie waarin het systeem zich bevindt, zoals watergehalten of de pH op een gegeven positie. Zowel eigenschappen als toestanden kunnen op verschillende ruimtelijke schalen worden beschouwd: een porie, een kluitje, een bodemlaag of een vervuilde locatie.

Processen worden gekenmerkt door hun dynamische karakter en dus door snelheden waarmee toestandsveranderingen optreden, zoals de stroming van water of de respiratie van organische verbindingen. Sommige processen zijn intrinsiek niet-lineair, zoals de waterstroming in de onverzadigde zone van de bodem, ten gevolge van de sterk niet-lineaire transporteigenschappen. Andere processen kunnen door heterogeniteiten op een kleinere ruimtelijke schaal niet-lineair worden, bijvoorbeeld de afbraak van een verontreiniging in een kluit ten gevolge van verschillende transportsnelheden. Processen in aanwezigheid van heterogeniteit verlopen dus anders dan in een homogene omgeving. Een gemiddelde toestand of een gemiddelde waarde voor een bodemeigenschap is lang niet altijd voldoende om te begrijpen wat er gebeurt.

Als praktisch voorbeeld kan de verontreiniging van een bodem met dieselolie worden beschouwd. De natuurlijke bodem is heterogeen ten gevolge van de profielopbouw en het voorkomen van structurelementen, zoals kluiten met afwijkende bodemeigenschappen. De bodem is verontreinigd met dieselolie die zich via diverse transportprocessen over een bodemvolume heeft verdeeld. De afbraak van deze dieselolie zal samenhangen met de locatie waarop de dieselolie zich bevindt en de mogelijkheden voor het afbraakproces om te verlopen. In eerste instantie zou de dieselolie op goed geaëreerde plaatsen snel afgebroken kunnen worden, terwijl dieselolie in dichte kluiten langzaam of niet wordt afgebroken. De interactie tussen de verdeling van dieselolie, het transport van zuurstof op de schaal van het bodemprofiel en het transport van zuurstof naar de locaties waar de dieselolie het langst aanwezig blijft, bepaalt grotendeels de uiteindelijke bodemreiniging.

Het optreden van heterogeniteit op verschillende schaalniveaus hangt samen met het proces dat wordt onderzocht. Het is daarom goed om onderscheid te maken tussen de processen die bij biologische bodemreiniging dominant zijn.

## HOOFDSTUK 2

### PROCESSEN BIJ BIOLOGISCHE BODEMREINIGING

Bij het bespreken van de processen die bij biologische bodemreiniging optreden, wordt in eerste instantie van een natuurlijke bodem uitgegaan waarin de processen, na een vervuiling, op een natuurlijke wijze verlopen (zie ook 2.7).

#### 2.1 Biologische afbraakprocessen

Biologische afbraakprocessen zijn het resultaat van de activiteit van micro-organismen. De omzettingen vinden plaats op de microschaal ( $\approx 1 \mu\text{m}$ ) en worden meestal bepaald door de gelimiteerde aanvoer van nutriënten of zuurstof naar de plaatsen waar de activiteit plaatsvindt. In het algemeen kan er op de macroscopische schaal van enkele centimeters worden gewerkt met relaties tussen activiteit, zuurstofverbruik en temperatuur, als we met een milieutechnische benadering het proces willen beschrijven. Deze relaties zullen sterk kunnen verschillen voor grondsoorten met verschillende bodemstructuur ten gevolge van verschillen in nutriënten- of zuurstoftransportnelheden.

#### 2.2 Waterstroming in de verzadigde en onverzadigde zone

In eerste instantie bepaalt de waterstroming in de onverzadigde zone de actuele watergehalten en daarmee de mogelijkheden voor biologische activiteit. Indirect wordt door de waterhuishouding de mogelijkheden voor zuurstoftransport bepaald. Afhankelijk van de grondsoort kan de waterstroming zeer heterogeen zijn ten gevolge van preferente stroming door scheuren of macroporiën of door waterafstotendheid in de bovengrond [De Rooij, 1996]. Veelal komt deze heterogeniteit tot uiting bij infiltratie. Ook verschillen in de hydraulische eigenschappen van de bodem, zoals de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek, kunnen aanleiding geven tot heterogeniteit. Verschillen in watergehalten in de onverzadigde zone kunnen optreden op een schaal van enkele centimeters tot enkele decimeters als we te maken hebben met preferente stroming. In het geval dat we met (micro-)reliëf van het bodemoppervlak te maken hebben, kan de heterogeniteit zich op de schaal van cm-dm (lokale reliëf) tot honderden meters (hellingen) uitstrekken.

In de verzadigde zone zullen verschillen in waterdoorlatendheid de voornaamste oorzaak zijn van heterogeniteit. Het optreden van gelaagdheid en het voorkomen van lenzen zijn hiervan een voorbeeld. De schaal van deze heterogeniteit varieert van centimeters tot enkele tientallen meters. Deze heterogeniteit uit zich vooral door verschillen in stroomsnelheden van het water.

De waterstroming bepaalt direct het convectief transport van opgeloste of meegevoerde stoffen. Bij meerfasen-stroming is de stroming van water ook van grote invloed op het gedrag van de overige vloeibare fasen.

#### 2.3 Convectief stoffentransport

Onder convectief stoffentransport wordt verstaan het transport van (opgeloste) stoffen ten gevolge van de waterbeweging of de beweging van een andere vloeistof. Dit convectief transport wordt in het algemeen bepaald door de waterbeweging. Bij meerfasen-stroming moet met de dichtheden van de verschillende vloeistoffen rekening worden gehouden.

De heterogeniteit van het convectieve stoffentransport hangt samen met de heterogeniteit van de waterstroming en de verdeling van de stoffen in het bodemprofiel. In het algemeen worden de transporteigenschappen, zoals de dispersielengte, op een zodanige macroscopische schaal

gedefinieerd dat het stoffentransport op de schaal van enkele meters kan worden berekend. Voor biologische afbraak kunnen de transporteigenschappen op kleinere schaal even belangrijk zijn, zeker als het gaat om restconcentraties, die zich op moeilijk toegankelijke plekken bevinden, te minimaliseren. Voor de grootschalige verspreiding van verontreinigingspluimen kan weer met de macroscopische schaal worden gewerkt.

#### 2.4 Gastransport in de onverzadigde zone

De mogelijkheden voor gastransport in de onverzadigde zone worden sterk bepaald door het luchtgevuld poriënvolume en dus door de waterhuishouding. Zuurstofdiffusiecoëfficiënten zijn sterk afhankelijk van de ruimtelijke schaal. Deze coëfficiënt kan op de schaal van enkele millimeters (b.v. in een bodemaggregaat) een factor 100 lager zijn dan op de macroscopische schaal (cm-dm) waar de invloed van een enkele scheur doorslaggevend kan zijn [Rappoldt, 1995]. Het transport van zuurstof is ook van invloed op de redoxtoestand.

#### 2.5 Biogeochemische reacties en uitwisseling

Biologische afbraak van verontreinigingen wordt onder andere bepaald door de chemische condities in de bodem. In de bodem kan, afhankelijk van de watergehalten en de chemische componenten die in de bodem aanwezig zijn, de biologische afbraaksnelheid worden versneld of vertraagd [De Jonge, 1996]. De aanwezigheid van een geschikte elektronenacceptor ( $O_2$ ,  $NO_3^-$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $CO_2$ ,  $SO_4^{2-}$ ) bepaalt of een reactie al dan niet kan verlopen. Daarnaast bepaalt de concentratie van de elektronenacceptor hoeveel van een verontreiniging kan worden afgebroken. Ook de afbraaksnelheid kan worden beïnvloed door de concentratie van de elektronenacceptor. Het voorkomen van elektronenacceptoren kan samenhangen met de grondwaterstand en zuurstofgehalten, maar ook met de aanwezigheid van precipitaten in de bodem ( $Fe^{3+}$ ) of de samenstelling van het bodem- of grondwater ( $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ).

In een natuurlijke bodem, die niet is verontreinigd, kunnen in de onverzadigde zone verschillen in ruimtelijke macroscopische verdelingen van  $Fe^{3+}$ ,  $NO_3^-$ , en  $SO_4^{2-}$  optreden op de schaal van decimeters, terwijl in de verzadigde zone door de betere menging in het grondwater op deze kleine schaal kleinere verschillen worden verwacht. In het geval dat we met een verontreiniging te maken hebben, kunnen in een verontreinigingspluim de elektronenacceptoren reeds verbruikt zijn, waardoor het afbraakproces daar stopt en er door het proces zelf heterogeniteit is ontstaan.

De biologische afbraaksnelheid in de bodem onder in situ omstandigheden is meestal lager ten opzichte van afbraaksnelheden die gemeten worden in microbiologische experimenten op laboratoriumschaal met verontreinigingen in oplossing. De oorzaak hiervan is de verdeling van de verontreiniging over de vaste fase en de vloeibare fase in de bodem. Een dergelijke verdeling wordt beschreven met  $K_d$ -waarden. Hoe hoger de  $K_d$  des te sterker de binding aan de bodem is. Dit leidt tot vertraging in het transport van de verontreiniging door de bodem ten opzichte van convectief transport in de waterfase. In veel literatuur wordt een relatie gelegd tussen de organische stofconcentratie en de verontreinigingen. Een probleem hierbij is dat elke organische stof specifieke bindingseigenschappen voor verontreinigingen vertoont. Bij in situ verontreinigde grond is altijd een gradiënt in de organische stofconcentratie aanwezig, waarbij meestal nabij het bodemoppervlak een relatief hoge organische stofconcentratie aanwezig is, terwijl naar grotere diepten deze concentratie afneemt. De rol van organische stof lijkt vooral voor hydrofobe verontreinigingen van belang die een sterke binding aan de organische stof in de bodem vertonen.

De binding van verontreinigingen aan de bodem blijkt in de praktijk van de bodemsanering toe te nemen met de tijd dat de bodem verontreinigd is. Deze veroudering van de verontreiniging leidt dan tot een afname van de biobeschikbaarheid van de verontreiniging. Uit modellen, die sorptie van verontreiniging aan de bodem beschrijven, blijkt dat desorptie vanuit poriën trager verloopt

dan sorptie aan de bodem [Griffioen en Hetterschijt, 1998]. Hieruit volgt dat de veroudering van verontreinigingen een belangrijke rol speelt bij de bepaling van de uiteindelijke saneringsduur. Experimenten met afgegraven verontreinigde grond laten zien dat de biobeschikbaarheid aanmerkelijk kan worden verhoogd door een thermische voorbehandeling van de verontreinigde grond [Bonten et al., 1998]. Het achterliggende idee hierbij is dat door temperatuurverhoging de verdeling van de verontreinigingen in de bodem wordt veranderd.

## 2.6 Plantengroei

### *Wateropname*

Een gewas kan per hectare per dag meer dan 50.000 liter water opnemen. Een droogtegevoelige zandgrond zal bij veldcapaciteit in de bovenste 30 cm van het profiel ongeveer 350.000 liter per hectare bevatten. Duidelijk wordt dat een gewas in een dergelijke situatie ondergronds dagelijks relatief grote transporten van water en ook van daarin opgeloste stoffen teweegbrengt.

### *Opname van nutriënten en (metaal)ionen*

Bij opname van ionen door de planten spelen twee processen een rol:

- a. de opname binnen de wortelcellen zelf, dit is een fysiologisch proces waarop niet nader wordt ingegaan;
- b. het transport vanuit de bodem via de bodemoplossing naar de wortel toe.

De snelheid van het opnameproces is meestal niet beperkend. Veelal reguleert de plant zelf de opname op basis van gehalten in de plant. De maximale opnamecapaciteit van een wortelstelsel is meestal vele malen groter dan de werkelijke opname. Met name het transport van ionen naar de plantenwortel toe wordt gezien als de beperkende factor voor de opname; dit transport gaat via diffusie en massastroming veroorzaakt door de wateropname van het gewas. In veel gevallen kan de potentiële opname dus worden beschreven als een fysisch-chemisch transportproces (zie 2.3) met de bewortelingsintensiteit (in lengte van de wortels per volume-eenheid grond) als enige plantparameter. De actuele (werkelijke) opname wordt verder bepaald door andere gewaskarakteristieken, zoals snelheid van groei, gehalten in de plant, enzovoorts.

### *Exudatie door plantenwortels*

Wortels nemen niet alleen stoffen op, maar scheiden ook stoffen uit die in de onmiddellijke omgeving van de wortels bepaalde effecten teweegbrengen die in het kader van in situ sanering van belang kunnen zijn. Gemiddeld wordt 30 - 60 % van de koolstof, die bij het fotosyntheseproces wordt geassimileerd, ondergronds aangewend. Een aanzienlijk deel hiervan (tot 70 %) wordt echter weer in de onmiddellijke omgeving van de wortel uitgescheiden als organische koolstofverbindingen. Deze zogenaamde rhizodepositie is nogal variabel en wordt beïnvloed door stressfactoren.

### *Fysische effecten van de beworteling*

Gastransport in de bodem zal vooral door een lager watergehalte in de bodem worden gestimuleerd. Met name een frequent uitdrogingsregime zal grote gevolgen kunnen hebben voor diffusie van O<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub> en daarmee op de biodegradatie van bijvoorbeeld organische verbindingen. Wortels verbruiken (wortelrespiratie) of leveren O<sub>2</sub> (b.v. riet) aan de bodem. Beworteling heeft bovendien een mechanisch effect door het 'omzetten' van grond. In het algemeen zullen de structuur en het poriënvolume door de beworteling worden verbeterd. De beworteling breekt de grond als het ware open, waardoor de biobeschikbaarheid van een verontreiniging wordt vergroot.

## 2.7 Technieken om het afbraakproces te versnellen

Er worden allerlei technieken in de bodemsanering gebruikt om ervoor te zorgen dat de afbraak sneller of verdergaand (lagere restconcentraties) verloopt. In principe verlopen de processen die hiervoor besproken zijn niet anders, maar dikwijls wel sneller. Enkele reeds toegepaste technieken zijn:

- introduceren van specifieke micro-organismen;
- luchtinjectie [Van der Zee en Van Dijke, 1997];
- (grondwater)circulatie;
- toevoeging van nutriënten;
- grondbewerking (o.a. 'landfarming') [Freijer, 1994];
- fytoremediatie (zie bijlage B);
- mechanisch trillen;
- verhoging van de temperatuur door verwarming, bijvoorbeeld door middel van stoominjectie.

## HOOFDSTUK 3

### EXPERIMENTEN OP VERSCHILLENDE SCHALEN

Achtereenvolgens worden nu experimenten op verschillende ruimtelijke schalen besproken en bij elke schaal wordt aangegeven wat de mogelijkheden en de beperkingen zijn [De Kreuk, 1997]. Bij elke schaal wordt een praktisch voorbeeld gegeven van een experiment dat zinvol op deze schaal kan worden uitgevoerd. Vervolgens worden de relaties tussen de processen op de verschillende schalen en de mogelijkheden van opschaling besproken. In hoofdstuk 6 wordt verder ingegaan op de mogelijkheden die een grootschalige onderzoeksfaciliteit biedt bij het onderzoek naar biologische in situ bodemreiniging.

#### 3.1 Batchexperimenten

Dit zijn experimenten met kleine hoeveelheden grond (ca. 10 - 50 gram), dikwijls in de vorm van slurry, soms als veldvochtige grond. Deze grond wordt in een potje gestopt (open of afgesloten) en vervolgens wordt het effect van een enkele factor op de afbraaksnelheid gemeten.

Enkele karakteristieken van deze experimenten zijn:

- meting van de potentiële afbraaksnelheid;
- effect van toxiciteit, extra nutriënten op microbiële processen kan worden onderzocht;
- snel uitvoerbaar;
- transportprocessen zijn niet limiterend, hun betekenis kan dus ook niet worden waargenomen.

Voorbeeld: Het vaststellen van de maximale afbraaksnelheid van een verontreiniging onder optimale omstandigheden met betrekking tot nutriëntenvoorziening, abiotische factoren (water, zuurstof, temperatuur) en aantallen micro-organismen.

#### 3.2 Kolomexperimenten

Dit zijn experimenten op een wat grotere ruimtelijke schaal (50 gr - 40 kg grond), waarbij eventueel het monster met water of gas kan worden doorstroomd.

Enkele karakteristieken van deze experimenten zijn:

- transportprocessen op de schaal van structurelementen, zoals kluiten, worden onderzocht;
- vergelijking met batchexperimenten levert inzicht in de mate waarin deze processen de afbraaksnelheid limiteren;
- effect van roeren (verstoring van de structuur) kan worden onderzocht;
- effect van transportprocessen op profielschaal en op veldschaal kan niet worden waargenomen.

Voorbeeld: Het meten van de afbraak van een verontreiniging in een cilinder die met (ongestoorde) grond gevuld is en met lucht wordt geventileerd, waarbij de CO<sub>2</sub>-productie in de loop van de tijd wordt gemeten [Malina et al., 1995].

#### 3.3 Lysimeterexperimenten

Dit zijn experimenten op een wat ruimtelijke schaal die groter is dan die van de kolomexperimenten, waarbij eventueel het bodemprofiel met water of gas kan worden doorstroomd. Dikwijls kan er ook een gewas op de bodem groeien, zodat ook de invloed van beworteling kan worden bestudeerd.

Enkele karakteristieken van deze experimenten zijn:



- ook op deze schaal is de invloed te onderzoeken van transportprocessen op de schaal van de aanwezige structurelementen, zoals kluiten;
- grootschaligere transportprocessen zijn beperkt tot de verticale richting (eendimensionaal); de horizontale waterstroming ontbreekt;
- in het algemeen zijn lysimeters zo groot dat deze gevuld moeten worden met grond, waardoor de bodemstructuur verloren kan gaan. Er zijn echter voorbeelden, voornamelijk in de V.S. (Michigan University), van onderzoek met ongestoorde grondkolommen. Het betreft veelal studies naar bodemecosystemen. Bemonsteren en meten van processen wordt in dit geval moeilijker dan in 'geroerde' grond.

Voorbeeld: Het meten van uitspoelingsexperimenten in een reservoir van  $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ , eventueel begroeid met een gewas, waarbij aan de onderzijde het percolatiewater wordt opgevangen.

### 3.4 Experimenten in een grootschalige onderzoeksfaciliteit

Dit zijn experimenten waarbij de ruimtelijke schaal nog groter is dan die van de lysimeterexperimenten. Ook in horizontale richting treedt waterstroming en stoffen- of gastransport op. De mogelijkheden van zo'n faciliteit worden in hoofdstuk 6 uitvoeriger besproken.

Enkele karakteristieken van deze experimenten zijn:

- grootschalige transportprocessen (die niet aan structurelementen gebonden zijn) hebben ook een horizontale component;
- experimenten zijn langdurig en arbeidsintensief door de lange procedures om de reservoirs ('bakken') te vullen en de lange verblijftijden van stoffen in het systeem [Hwu et al., 1999].

### 3.5 Veldproeven

Bij veldproeven spelen alle processen zich tegelijkertijd af en is het moeilijk de effecten van de diverse processen uit elkaar te halen. De (transport-)parameters zijn in een veldsituatie moeilijk te kwantificeren en dikwijls zeer heterogeen [Boekhold, 1992]. Wel is dit de ruimtelijke schaal waar het uiteindelijk om gaat.

Voorbeeld: Het in detail volgen van de verspreiding en afbraak van een verontreiniging op een locatie na het opzettelijk toedienen van een verontreiniging door middel van het continu meten van de waterstroming, de concentratie van de verontreiniging, de zuurstofconcentraties en de  $\text{CO}_2$ -productie.

### 3.6 Opschaling

Onder opschaling wordt verstaan het aanbrengen van een verband tussen een proces op een relatief kleine schaal en het uiteindelijk resultaat op een grotere schaal. Een procesbeschrijving leidt slechts tot begrip van het systeem als er ten minste twee schaalniveaus worden beschouwd. Het laagste niveau dient dan als het verklarende niveau. Een voorbeeld van een model met twee schaalniveaus is een transportmodel voor een homogene bodem. Het gedrag van de bodem wordt 'verklaard' uit de transporteigenschappen van het poreuze materiaal waaruit de bodem bestaat en die bijvoorbeeld gemeten zijn aan kleine monsters van  $100 \text{ cm}^3$ . Een model voor een heterogeen systeem kan in principe een reeks schaalniveaus omvatten. Een dergelijk model vergt gewoonlijk zeer veel invoergegevens en verliest mede daardoor aan praktische betekenis. Een model met slechts één schaalniveau is een empirische beschrijving van het systeem.

In het algemeen zullen reinigingsprocessen worden beschreven met behulp van een transportmodel, bijvoorbeeld een model voor convectief transport van een verontreiniging. Een onderdeel

daarvan is een afbraaksnelheid, die dan zal moeten worden gemeten op een kleinere schaal als functie van de temperatuur, de zuurstofconcentratie, het watergehalte, enzovoorts.

In een heterogene bodem is de afbraaksnelheid niet gelijk aan de gemeten afbraaksnelheid in een batchexperiment in een kleine hoeveelheid grond. De heterogeniteit van de verontreiniging en/of van de bodemeigenschappen zal leiden tot een verlaging ten opzichte van de potentiële afbraaksnelheid. Kwantitatief inzicht daarin vergt een beschrijving van die heterogeniteit in de kleinschalige processen. Zo'n beschrijving zal in het algemeen geen deel meer uitmaken van een model voor de veldschaal.

Het is van belang in het oog te houden wat de bedoeling is van een model. De belangrijkste vraag voor in situ bodemreiniging is: "Hoe lang gaat dat duren?". Afhankelijk van de situatie kan een antwoord uiteenlopen van "enkele dagen" tot "vele eeuwen". Het verkleinen van deze onzekerheid is de eerste opgave van iedere concrete processtudie. Zo'n studie zal altijd beginnen met het identificeren van de relevante processen en van de heterogeniteiten die voor die processen van belang zijn. Metingen aan kolommen (zie 3.2) kunnen daarbij zeer verhelderend zijn. Ze geven op relatief eenvoudige wijze een idee van de tijdschaal waarop de afbraak kan plaatsvinden. Ze zijn verder essentieel voor de interpretatie van experimenten op grotere schaal of van in situ experimenten.

## HOOFDSTUK 4

### MODELLEN OP VERSCHILLENDE SCHALEN

Voor de interpretatie van alle experimenten is het wenselijk om over goede conceptuele modellen te beschikken. Het liefst over deterministische modellen waarmee de afbraak in de bodem kan worden beschreven. Dit project heeft niet als doel om alle beschikbare modellen te inventariseren, maar het leek toch zinvol om illustratief een aantal modellen te noemen die op verschillende schalen toepasbaar zijn:

- a. Een model voor de beschrijving van *partiële anaërobie in een onverzadigd bodemaggregaatje (cm)*, waarin de uitwisseling van water, gassen en denitrificatie wordt beschreven [Leffelaar, 1987].
- b. Een model voor *zuurstoftransport in een geaggregeerde grond (cm-dm)*, waarbij de zuurstofdiffusie vanuit macroporiën naar de bulkgrond wordt beschreven [Rappoldt, 1992].
- c. Een model waarmee *eendimensionale waterstroming en stoffentransport* in de onverzadigde zone van de bodem kan worden beschreven (*dm-m*), inclusief de opname van water en nutriënten: SWAP [Van Dam et al., 1997].
- d. *Eendimensionaal model* voor de beschrijving van de dynamiek van *water, gas en warmte* in een met olie verontreinigde landfarm (*1 m - 2 m*) [Freijer, 1994].
- e. Een model waarmee *tweedimensionale waterstroming en stoffentransport* in de onverzadigde én verzadigde zone van de bodem kan worden beschreven (*1 m - 100 m*), inclusief de opname van water en nutriënten: HYDRUS-2D [Simunek et al., 1996; De Vos, 1997] en FUSSIM [Heinen, 1997].
- f. Een *meerfasen-stromingsmodel* voor de tweedimensionale beschrijving van het gedrag van meer dan één naast elkaar voorkomende fasen in de bodem (*dm-m*) die onderling niet oplosbaar zijn [Van Dijke, 1997].

### BESTAANDE GROOTSCHALIGE ONDERZOEKSFACILITEITEN

#### 5.1 Bestaande onderzoeksfaciliteiten in Nederland

Er zijn vijf grootschalige onderzoeksfaciliteiten bezocht die enige relatie hebben met verontreinigde bodems en waterbodems. Tijdens deze bezoeken is eerst nagegaan wat het specifieke doel van de onderzoeksfaciliteit is. Vervolgens is besproken hoe men tot de keuze van de schaalgrootte is gekomen. Tenslotte zijn de opzet en de resultaten besproken van recente experimenten en de algemene aspecten met betrekking tot het management van grootschalige onderzoeksfaciliteiten. In de bijlagen C t/m I zijn de details van enkele onderzoeksfaciliteiten te lezen. Nu zullen kort de algemene aspecten besproken worden.

##### 5.1.1 Doelstellingen

Onderzoek in grootschalige faciliteiten is meestal gericht op validatie van modellen of van de toepasbaarheid van laboratoriumexperimenten. In de onderzoeksfaciliteit van Arcadis (zie bijlage G) staat de validatie van een rekenmodel centraal. Dit model is ontwikkeld voor de beschrijving van biologische processen bij de afbraak van olie in verontreinigde grond in een landfarm. In het geotechnische onderzoek van Grondmechanica Delft (zie bijlage H) ligt de nadruk op de validatie van waterstromingsmodellen voor de bodem. De faciliteiten, een modelbak en een geocentrifuge, hebben als eerste doel de ondersteuning van het geotechnisch onderzoek, maar ze zijn ook geschikt voor milieuonderzoek. Validatie van ecotoxicologische laboratoriumexperimenten is het doel van de grootschalige faciliteiten van de Vrije Universiteit Amsterdam (zie bijlage I). Op de Sinderhoeve te Renkum (Alterra) worden de ecotoxicologische gevolgen onderzocht van de toepassing van verschillende bestrijdingsmiddelen op grote schaal (zie bijlage C). Op de Oostwaardhoeve te Slootdorp (IMAG) staat de demonstratie van de combinatie van reiniging van baggerspecie en energieteelt centraal (zie bijlage D).

In een rhizotron kan in het algemeen de beworteling van gewassen visueel worden bestudeerd. Het Rhizolab van Plant Research International (zie bijlage E) is eveneens een rhizotron-onderzoeksfaciliteit maar verschilt van elders aanwezige rhizotrons doordat ruimer dan alleen naar wortels wordt gekeken. Bovendien kunnen niet alleen ondergrondse processen worden onderzocht, maar kan ook simultaan aandacht worden besteed aan bovengrondse processen.

##### 5.1.2 Schaalgrootte

- De keuze van de schaalgrootte bij de proefhal van Arcadis (afmeting 5 bakken:  $h \times b \times l = 1,45 \times 5,15 \times 7 \text{ m}^3$ ) komt overeen met een deel van een 'kasfarmsysteem'. In de proefhal zijn meetsystemen aangebracht die in principe ook op de praktijkschaal kunnen worden toegepast. Hierdoor wordt de vertaalslag naar de praktijk bij deze schaalgrootte relatief klein.
- De keuze van de grootte van de modelbak bij Grondmechanica Delft (afmeting bak:  $h \times b \times l = 2,5 \times 2,5 \times 7,5 \text{ m}^3$ ) is bepaald aan de hand van de randvoorwaarden van de gebruikte rekenmodellen. Tevens hebben de kosten een rol gespeeld bij de keuze van de schaalgrootte. De schaalgrootte van de geocentrifuge is gekozen op basis van de benodigde krachten die in het systeem moeten kunnen worden onderzocht.
- Op de Vrije Universiteit Amsterdam is in 5 series van 10 bakken (afmeting per bak:  $h \times b \times l = 1,0 \times 0,5 \times 1,0 \text{ m}^3$ ) een concentratiegradiënt van zink aangebracht. De grootte van dit systeem is zodanig dat de laboratoriumtoets hierin representatief kon worden uitgevoerd, zonder beperkingen van randeffecten.

- De afmetingen van de proefsloten van de Sinderhoeve (Alterra) zijn zo gekozen dat er zich een ecologisch evenwicht in kan ontwikkelen dat zoveel mogelijk overeenkomt met sloten in de praktijk.
- De schaal van 10 ha van het demonstratieproject op de Oostwaardhoeve (IMAG) is onder andere bepaald door de minimale grootte van de oogstapparatuur voor het energiegewas (wilgen).
- Op het Wageningen Rhizolab hebben de individuele compartimenten een afmeting van 1,25 x 1,25 x 2 m<sup>3</sup>. Overwegingen om voor deze schaal te kiezen zijn voornamelijk gebaseerd op bewortelingsaspecten. Onderzoek moest mogelijk zijn op semi-veldschaal. Een ongestoorde beworteling (niet beperkt door randen) is dan een voorwaarde; circa 1,5 m<sup>2</sup> is hier beschouwd als de minimale oppervlakte waarbij op *gewasniveau* onderzoek kan worden gedaan (zie verder bijlage E).

### 5.1.3 *Management van grootschalige onderzoeksfaciliteiten*

Uit de interviews blijkt dat door veranderende onderzoeksvragen het moeilijk is om een grootschalige onderzoeksfaciliteit in stand te houden. Waarborgen voor de continuïteit van onderzoek op langere termijn moeten daarom voor de bouw van een faciliteit worden verkregen.

Om veranderende onderzoeksvragen toch te kunnen beantwoorden moet een faciliteit flexibel zijn, dat wil zeggen aanpasbaar aan nieuwe methoden, inzichten en schaalgrootte. De indruk ontstond dat een grote schaal van de faciliteit vaak leidt tot een afname in de flexibiliteit van de inrichting van experimenten.

Het succes van een grootschalige faciliteit hangt ook sterk af van de aanwezige infrastructuur. Het gaat hierbij om de aanwezigheid van een kritische massa aan gekwalificeerd personeel en een goede outillage voor de experimentele apparatuur.

(Zie ook bijlage C t/m I).

## 5.2 **Grootschalige onderzoeksfaciliteiten in het buitenland**

### 5.2.1 *VEGAS-project (Stuttgart, Duitsland)*

Het VEGAS-project [Barczewski en Koschizky, 1996] in Stuttgart (Duitsland) beschikt over een grootschalige onderzoeksfaciliteit. De strategische doelstelling van VEGAS is om op termijn de processen in het veld zo goed te kunnen beschrijven dat betrouwbare voorspellingen over in situ reinigingsprocessen kunnen worden gedaan. VEGAS heeft als praktisch doel om nieuwe praktijkmethoden eerst in een grootschalige onderzoeksfaciliteit te testen, waarbij het vervuilen van de omgeving wordt voorkomen. De onderzoeksfilosofie is om zo eenvoudig mogelijk (kolomschaal, eendimensionaal) te beginnen en vervolgens naar een complexer, hoger schaalniveau te gaan. Er worden studies uitgevoerd op een schaal tussen de kolom- en veldschaal, met de mogelijkheid om twee- en driedimensionale transportproblemen te onderzoeken onder gecontroleerde omstandigheden. In het VEGAS-onderzoek is veel aandacht voor het transport van verontreinigingen in de verzadigde en onverzadigde zone. De modernste sensoren worden gebruikt en getest om verontreinigingen en abiotische condities te meten. De experimenten duren dikwijls enkele jaren, aangezien het vullen en leeghalen van de reservoirs erg veel tijd (enkele weken - maanden) en geld kost. Er moet dus optimaal gebruik worden gemaakt van de gevulde reservoirs. Dit heeft wel tot gevolg dat er bij het uitvoeren van nieuwe experimenten met een verontreinigde uitgangssituatie moet worden gestart, wat de flexibiliteit in het uitvoeren van experimenten beperkt. De kosten voor het verwijderen en afvoeren van verontreinigde grond worden geschat op zo'n 1 miljoen mark voor het grootste bodemreservoir. Steeds wordt er voor een goede aansluiting tussen de modellen die de processen beschrijven en de experimenten gezorgd. In het VEGAS-project is er veel aandacht voor modelontwikkeling, zowel op het hydro-

logische en chemische gebied als op het biologische gebied. Dit modelonderzoek is fundamenteel van aard en beperkt zich tot in situ processen.

Drie karakteristieke projecten van de in totaal 15 onderzoeksprojecten zijn:

- stoominjectie in de bodem om verontreinigingen met lange ketens te vervluchtigen;
- transport van TCE in een tweedimensionaal systeem (16 m lengte);
- DNAPL-gedrag in een verzadigd/onverzadigd systeem.

De keuze van de afmetingen van de gebruikte bodemreservoirs was moeilijk te achterhalen. De afmetingen werden beperkt door de fysieke mogelijkheden van de bouwlocatie. Dit resulteerde in een grootste bodemreservoir van (h x b x l) 4,7 x 9 x 18,5 m<sup>3</sup>. De indruk werd gewekt dat op een andere locatie een nog groter bodemreservoir gebouwd had kunnen worden. In de praktijk bleek echter dat dit grootste bodemreservoir niet in zijn geheel werd gebruikt, maar in diverse componenten werd onderverdeeld ten behoeve van verschillende experimenten. De keuze van de dimensies is afhankelijk van het te bestuderen probleem. Bij afmetingen van enkele kubieke meters (b.v. 2 x 2 x 2 m<sup>3</sup>) kunnen echter al twee- en driedimensionale verontreinigings- en transportproblemen worden bestudeerd. Het onderzoek naar het tweedimensionale gedrag van DNAPL werd in een reservoir met dergelijke afmetingen bestudeerd.

Het VEGAS-onderzoek vindt altijd plaats in verstoorde veldbodems of in modelsystemen, aangezien de reservoirs met grond moeten worden gevuld. De kwaliteit van het vullen is moeilijk vast te stellen en er kunnen grote verschillen ontstaan tussen verwachte en werkelijke waarden van bijvoorbeeld waterdoorlatendheden. Tot nu toe wordt vooral gewerkt met een vrij grove zandgrond (met een zeer laag organisch stofgehalte), die als chemisch inert kan worden beschouwd. Het vullen van de reservoirs met zo'n materiaal is relatief eenvoudig uit te voeren. Andere grondsoorten, zoals klei, leem of veen, zullen bij het vullen veel grotere problemen geven. Het is alleen aan het einde van het experiment mogelijk om de bodemeigenschappen vast te stellen door middel van destructieve methoden, dat wil zeggen door het bemonsteren van het reservoir. Grondwaterstromingen worden in het grove zand ingesteld door waterinjectie via geperforeerde buizen aan de randen van het reservoir. Tracerexperimenten blijken vervolgens een goed inzicht te geven in het transportgedrag van het gehele systeem. Er is een nieuwe methode ontwikkeld, waarbij door fluorescentie en glasfibertechniek de concentratie van een organische kleurstof in de bodem is te meten. Er wordt nog onderzocht of de organische kleurstof met een hoog molecuulgewicht een representatieve tracer is voor verontreinigingen. Bij tracerexperimenten met lange verblijftijden kan de afbreekbaarheid van deze tracer een probleem worden.

De organisatie van VEGAS bestaat uit 2 directeuren, 3 onderzoekers, 5 technici en 1 secretaresse. De deelstaat Baden-Württemberg zorgt voor de basisfinanciering. Het overige personeel wordt uit projecten gefinancierd. De werkelijke kosten voor ondersteuning, afschrijving, enzovoorts worden niet op de projecten geboekt, maar indirect door de universiteit betaald. Er kan door derden gebruik worden gemaakt van de VEGAS-faciliteiten. Dit kan in een internationaal samenwerkingsverband of tegen betaling voor de gebruikte faciliteiten en ondersteuning.

### 5.2.2 *IFARE (Frankrijk) en Waterloo (Canada)*

Het is bekend dat er in Frankrijk (zie bijlage F) en Canada ook grootschalige onderzoeksfaciliteiten aanwezig zijn. Op dit moment zijn de karakteristieken van deze faciliteiten bij ons nog niet bekend.

### MOGELIJKHEDEN VAN EEN GROOTSCHALIGE ONDERZOEKSFACILITEIT

In het voorgaande is de plaats van een grootschalige onderzoeksfaciliteit geschetst ten opzichte van experimenten op kleinere schaal en op de veldschaal. De afmetingen van een grootschalige onderzoeksfaciliteit worden bepaald door de eis dat er ook tweedimensionale grondwaterstromingen kunnen worden ingesteld. Tevens is dan gecombineerd onderzoek in de verzadigde en onverzadigde zone mogelijk. Dit houdt in dat een grootschalige onderzoeksfaciliteit ten minste een aantal meters groot is en daarmee qua afmetingen kleiner dan de veldschaal. Als we alleen geïnteresseerd zijn in de eendimensionale processen in de onverzadigde zone, dan is een kleinere lysimeter, zoals bijvoorbeeld het Wageningen Rhizolab, voldoende groot.

De vraag is wat een experiment in een grootschalige onderzoeksfaciliteit onderscheidt van een in situ experiment op een vervuilde locatie. Ook op een vervuilde locatie kan immers een groot aantal sensoren worden geïnstalleerd en monsters worden genomen. Bovendien is in een grootschalige onderzoeksfaciliteit een specifieke praktijksituatie meestal niet na te bootsen door het probleem van het vullen van de reservoirs. Hieronder zal worden getracht aan te geven wat er wel mee kan worden gedaan.

#### *Eigenschappen van een grootschalige onderzoeksfaciliteit*

Het reservoir van de grootschalige onderzoeksfaciliteit moet worden gevuld met grond. Voor het goed vullen is veel ervaring en kundigheid vereist, als hoge eisen aan de gecreëerde bodem worden gesteld. Het is mogelijk om doelbewust heterogeniteiten en verontreinigingen tijdens het vullen aan te brengen, zodat deze locaties nauwkeurig bekend zijn. Tijdens het vullen kunnen ook sensoren worden geplaatst op een groot aantal locaties. Door middel van het manipuleren van de grondwaterstanden aan de randen kunnen verschillende grondwaterstromingen worden ingesteld. Het is mogelijk door middel van berekening ook natuurlijke atmosferische bovenrandvoorwaarden na te bootsen. Eventueel is het ook mogelijk een gewas te laten groeien, maar dit stelt eisen aan de toetreding van zonlicht. In de faciliteit kunnen op beperkte schaal reinigingstechnieken worden getest en kunnen procedures worden ontwikkeld voor het testen en normaliseren van meetmethoden.

#### *Validatie van modellen*

Eerst moet een reinigingsproces op kolomschaal uitvoerig worden bestudeerd voordat een experiment in een grootschalige onderzoeksfaciliteit gerechtvaardigd is. De karakterisering van het proces op kolomschaal is ook een essentieel element van een model van het proces op grotere schaal. Het feit dat een praktijksituatie niet direct kan worden nagebootst betekent dat de modelontwikkeling een essentieel onderdeel moet zijn van ieder experiment. Het belangrijkste doel van een grootschalige onderzoeksfaciliteit wordt daarmee het toetsen van modellen om op die wijze een verantwoorde schatting te kunnen maken van de benodigde reinigingstijd in praktijksituaties.

#### *Ontwikkeling en testen van bioschermen*

Een grootschalige faciliteit leent zich uitstekend voor het ontwikkelen en testen van bioschermen. Een sleuf in de bodem wordt gevuld met een of ander materiaal waarin organismen leven die de ongewenste stoffen afbreken als ze het bioscherm bereiken met het grondwater. In een grootschalige faciliteit kunnen ontwerpen voor een bioscherm worden getest.

#### *Testen van monitoringsapparatuur*

Een andere toepassing is het testen van monitoringsapparatuur. Onder monitoren wordt in dit rapport verstaan het in detail meten van procesgrootheden, zoals watergehalten, zuurstofcon-

centraties, CO<sub>2</sub>-concentraties en concentraties van de verontreiniging, op een dusdanig kleine tijdschaal dat er informatie over de dynamiek van het afbraakproces wordt verkregen. Een grootschalige faciliteit biedt de mogelijkheid de dynamiek van verschillende processen intensief te bestuderen. Grondwaterstanden kunnen worden gevarieerd, vervuilingsbronnen zijn aangebracht en dus goed bekend en de apparatuur kan relatief eenvoudig worden vergeleken met nauwkeuriger en arbeidsintensievere methoden die gebaseerd zijn op destructieve bemonstering. Op dit moment zijn nauwelijks resultaten van monitoringsapparatuur onder goed gedefinieerde 'veld'omstandigheden beschikbaar.

#### *Vrijheid van experimenteren*

Een voordeel van een grootschalige onderzoekslocatie voor procesonderzoek is de mogelijkheid om niet-conventionele strategieën of handelingen uit te voeren die op een vervuilde locatie nooit kunnen worden toegestaan in verband met verplichtingen om de locatie zo snel mogelijk schoon te krijgen. Voor procesonderzoek kunnen bijvoorbeeld experimenten worden bedacht waarin afbraakprocessen worden vertraagd om inzicht te verkrijgen in deze processen. Het beheer van het experiment, met beperkte risico's op vervuiling van de omgeving, geeft de onderzoeker extra mogelijkheden ten opzichte van een praktijklocatie. Deze vrijheid kan ook worden verkregen door op een veldlocatie in eigen beheer procesonderzoek te doen, waarbij het verkrijgen van inzicht centraal staat en het verwijderen van de verontreiniging pas na het afronden van het onderzoek wordt uitgevoerd. Dit stelt eisen aan de aard en verwachte verspreiding van de verontreiniging.

Uit deze voorbeelden blijkt dat steeds de voordelen van een experiment in een grootschalige faciliteit moeten worden afgewogen tegen een experiment op een vervuilde locatie. Dat is een afweging die niet 'in het algemeen' kan worden gemaakt. Het ontwikkelen en testen van de werking van bioschermen is zonder een grootschalige faciliteit vermoedelijk niet goed mogelijk. In andere situaties zal het installeren van een groot aantal sensoren op een vervuilde locatie voordelen bieden. Beide typen onderzoek dienen vergezeld te gaan van kolomexperimenten in het laboratorium en modelontwikkeling.



## HOOFDSTUK 7

### CONCLUSIES

Alle grootschalige onderzoeksfaciliteiten bieden de mogelijkheid om (fysische) transport-, chemische en biologische modellen te evalueren. De processen die de biologische in situ reiniging bepalen moeten in deze modellen goed worden beschreven, zodat *de processen en hun samenhang goed worden begrepen en gekwantificeerd*. Deelprocessen kunnen beter apart in kolomexperimenten worden bestudeerd. Een grootschalige faciliteit moet dus worden gecombineerd met een goed uitgerust laboratorium voor procesonderzoek door middel van kolomexperimenten.

De belangrijkste uitkomst van een model is de verwachte reinigingstijd, waarvan een goede schatting moet worden gemaakt. Een gevuld bodemreservoir in een grootschalige onderzoeksfaciliteit moet als een apart systeem worden bestudeerd, om zo de bestaande *modellen te kunnen toetsen*. Door de beperkte ruimtelijke schaal en de kunstmatige vulling van de reservoirs zal nooit een echte veldsituatie kunnen worden nagebootst. Echter, als kolomproeven, resultaten in de grootschalige onderzoeksfaciliteit en model een redelijke mate van consistentie laten zien, kan men vertrouwen hebben in modeluitkomsten voor veldsituaties.

*Potenties van nieuwe saneringsmaatregelen* kunnen worden getest in een grootschalige onderzoeksfaciliteit, zoals het effect van een bioscherm of een ijzerscherm op de verwijdering van een verontreiniging. Ook hier is de combinatie met procesonderzoek op de kolomschaal wenselijk.

*Het testen van sensoren* moet eerst op kolomschaal plaatsvinden, eventueel in een grootschalige onderzoeksfaciliteit, en dan op veldschaal. Vooral bij het testen van monitoringsapparatuur kan het werken in een grootschalige faciliteit met een bekende (locatie van) verontreiniging onder geconditioneerde omstandigheden voordelen bieden.

Een grootschalige onderzoeksfaciliteit vergt een goede infrastructuur en organisatie. Het bouwen zal vooral op hydrologisch gebied de nodige kennis vragen. Er zal voldoende gekwalificeerd personeel moeten zijn voor het beheer van de faciliteit. De interactie tussen onderzoekers die zich richten op modellen en experimenten op kleinere schalen moet goed zijn georganiseerd. Als dit allemaal wordt gerealiseerd, biedt een grootschalige onderzoeksfaciliteit een goede mogelijkheid om tot een *betere proceskennis* met betrekking tot biologische in situ bodemreiniging te komen en om *praktische methoden en oplossingen* te testen. Voordat er experimenten in een grootschalige onderzoeksfaciliteit worden uitgevoerd, moet worden geïnventariseerd welke modellen er beschikbaar zijn en welke behoefte aan invoergegevens deze modellen hebben. Het uitvoeren van (grootschalige) experimenten en het verder ontwikkelen van deze modellen dient hand in hand te gaan.

In Nederland bestaan een aantal grootschalige onderzoeksfaciliteiten. In principe moet voor ieder specifiek probleem worden geanalyseerd welke faciliteit het meest geschikt is. Op dit moment lijken geschikt voor onderzoek naar in situ reiniging: het Rhizolab van Plant Research International (zie bijlage E), de proefhal van Arcadis Landfarming (zie bijlage G) en de geocentrifuge van Grondmechanica Delft (zie bijlage H). Deze faciliteiten worden gebruikt voor lopend onderzoek en zijn dus nog operationeel. Het Rhizolab van Plant Research International is het meest uitgebreid wat betreft meetapparatuur en voorzieningen om de condities in de bodem te regelen.

Een onderzoeksfaciliteit in de orde van grootte van (hoogte x breedte x lengte)  $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$  lijkt in eerste instantie voldoende om details van transportprocessen met betrekking tot in situ bodem-

verontreiniging te bestuderen. Met enige aanpassingen zou het Rhizolab van Plant Research International voor dergelijke experimenten geschikt te maken zijn. Bij experimenten op nog grotere schaal worden vooral de hydrologische aspecten van groot belang. Voor dit type onderzoek kan het beste van de VEGAS-faciliteit in Stuttgart gebruik worden gemaakt. Daar is de infrastructuur en de expertise aanwezig om experimenten op deze grote schaal uit te voeren. Er zijn maar enkele van deze grootschalige faciliteiten in de wereld aanwezig en het lijkt niet zinvol om in Nederland nog zo'n faciliteit te bouwen. De financiële, technische en organisatorische inspanningen die nodig zijn om een grootschalige onderzoeksfaciliteit te realiseren en te continueren wegen niet op tegen de toegevoegde waarde van deze faciliteit. Het is verstandiger om het Rhizolab van Plant Research International aan te passen voor grootschaligere experimenten in Nederland. Het Rhizolab is al goed geïnstrumenteerd en er is ervaring met het gecontroleerd vullen van de bodemreservoirs. Tevens kan er onderzoek worden verricht aan de interacties tussen gewassen en verontreinigde bodems. De aanpassingen betreffen het eventuele vergroten van de compartimenten ( $h \times b \times l = 2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ ), het kunnen instellen van grondwaterstromingen en veiligheidsvoorzieningen in verband met het werken met verontreinigingen. Er kan van de VEGAS-faciliteiten en ervaring gebruik worden gemaakt als blijkt dat experimenten op een nog grotere schaal noodzakelijk zijn.

#### *Oprichting van een Platform 'Grootschalige Faciliteiten'*

De oprichting van een nieuwe grootschalige onderzoeksfaciliteit ten behoeven van in situ reiniging lijkt geen noodzakelijke en geen haalbare mogelijkheid, gelet op bovenstaande conclusies en gelet op de ervaringen zoals wordt beschreven in de bijlagen C t/m/ I. De garantie voor continuïteit op langere termijn ontbreekt. Het is beter om een efficiënt gebruik van bestaande faciliteiten in binnen- en buitenland te stimuleren. Voor dit doel kan een *platform* worden opgericht voor grootschalige onderzoeksfaciliteiten.

Dit platform zal:

- de uitwisseling stimuleren van personen, technieken, apparatuur en materialen tussen faciliteiten;
- een flexibeler gebruik van de faciliteiten bevorderen;
- workshops organiseren waar onderzoeksresultaten worden besproken;
- in het algemeen de belangen behartigen van *alle* faciliteiten.

De coördinatie zou vanuit het SKB (Stichting Kennistransfer Bodem) kunnen plaatsvinden. Indieners van projecten bij SKB zullen via voorlichting door het platform worden gewezen op de voor hun project relevante mogelijkheden van de deelnemende faciliteiten. Mogelijkheden voor zo'n platform moeten verder worden onderzocht en uitgewerkt.

## LITERATUUR

Barczewski, B. en H.P. Koschizky, 1996.

The VEGAS Facility: Technical equipment and research projects.

In: H. Kobus, B. Barczewski and H.P. Koschizky (eds.), Groundwater and Subsurface Remediation, Research Strategies for In Situ Technologies, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 337 pp.

Boekhold, S., 1992.

Field scale behaviour of Cadmium in soil.

PhD-thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 181 pp.

Bonten, L.T.C., J.T.C. Grotenhuis en W.H. Rulkens, 1998.

Physical/chemical treatment of contaminated soil to enhance the biological availability of hydrophobic compounds.

In: Contaminated Soil '98, Proceedings of the Sixth International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, Edinburgh, UK, pp. 789-790.

Dam, J.C. van, J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk en C.A. van Diepen, 1997.

Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment.

Report 71, Dept. Water Resource, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.

Dijke, R. van, 1997.

Multi-phase flow modeling of soil contamination and soil remediation.

PhD-thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 149 pp.

Drent, J. en K. Kersting, 1992.

Experimental ditches for ecotoxicological experiments and eutrophication research under natural conditions.

Report 65, Alterra, Wageningen, 27 pp.

Freijer, J.I., 1994.

Mineralization of hydrocarbons and gas dynamics in oil-contaminated soils.

PhD-thesis, University of Amsterdam, The Netherlands, 170 pp.

Griffioen, J. en R.A.A. Hetterschijt, 1998.

On diffusive mass-transfer limitations in relation to remediation of polluted groundwater systems.

In: Contaminated Soil '98, Proceedings of the Sixth International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, Edinburgh, UK, pp. 231-240.

Heinen, M., 1997.

Dynamics of water and nutrients in closed, recirculating cropping systems in glasshouse horticulture with special attention to lettuce grown in irrigated sand beds.

PhD-thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.

Hwu, C.S., J.T.C. Grotenhuis, A.L. Smit en J. Groenwold, 1999.

Monitoring of bioventing and intrinsic remediation of kerosene at semi-field scale.

In: B.C. Alleman, A. Leeson (eds.), In situ bioremediation of petroleum hydrocarbon and other compounds.

Jonge, H. de, 1996.

Sorption, bioavailability and mineralization of hydrocarbons in contaminated soils.  
PhD-thesis, University of Amsterdam, The Netherlands, 150 pp.

Kreuk, J.F. de, 1997.

Evaluatie van methoden voor vooronderzoek ten behoeve van biologische in situ saneringen.  
PIT 3-rapport, CUR/NOBIS, Gouda.

Leffelaar, P.A., 1987.

Dynamics of partial anaerobiosis, denitrification, and water in soil: experiments and simulation.  
PhD-thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 117 pp.

Malina G., J.T.C. Grotenhuis, C. Cuypers en W. Rulkens, 1995.

Measurement of toluene bioconversion during bioventilation in a bench-soil column.

In: R.E. Hinchee, R.N. Miller, P.C. Johnson (eds.), Proceedings of In Situ and On Site Bioremediation.

Rappoldt C., 1992.

Diffusion in aggregated soil.

PhD-thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 162 pp.

Rappoldt, C., 1995.

Measuring the millimetre-scale oxygen diffusivity in soil using microelectrodes.

European Journal of Soil Science, 46: 169-177.

Rooij, G.H. de, 1996.

Preferential flow in water-repellent sandy soils. Model development and lysimeter experiments.

PhD-thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 229 pp.

Simunek, J., M. Sejna en M.Th. van Genuchten, 1996.

The HYDRUS-2D software package for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media - Version 1.0.

Research Report, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California.

Vos, J.A. de, 1997.

Water flow and nutrient transport in a layered silt loam soil.

PhD-thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 287 pp.

Zee, S.E.A.T.M. van der en M.I.J. van Dijke, 1997.

Dimensioneringsgondslagen van sparging.

Nederlands Landbouwkundig Tijdschrift 19: 575-578.

#### *Overige literatuur*

Bonten, L.T.C., J.T.C. Grotenhuis en W.H. Rulkens, 1999.

Enhancement of PAH biodegradation in soil by physicochemical pretreatment.

Chemosphere 38: 3627-3636.

## BIJLAGE A

### SAMENSTELLING VAN DE BEGELEIDINGSCOMMISSIE

De samenstelling van de begeleidingscommissie voor het NOBIS-project 'Monitoring van bio-venting/studie grote schaal faciliteit' is als volgt:

naam	instituut/bedrijf	plaats
J.T.C. Bohm	Nederlandse Aardolie Maatschappij	Assen
W.P.G. Ewalts	NITG TNO	Delft
dr.ir. S.M. Hassanizadeh	TU Delft - Faculteit der Civiele Techniek	Delft
ing. H. Mulder	Oosterhof Holman Milieutechniek bv	Tiel
drs. J.P. Okx	Tauw Milieu B.V. - Afdeling Research & Development	Deventer
ir. M. Pruijn	Heidemij Realisatie BV, Afdeling Research & Development	Waalwijk
ing. G.M.A. Ronteltap	Van Essen Instruments B.V.	Delft
dr.ir. S. Moolenaar	IWACO B.V.	Rotterdam
ing. J. Verheul	CUR/NOBIS	Gouda

## BIJLAGE B

### RELEVANTE PROCESSEN MET BETREKKING TOT FYTOREMEDIATIE

Een relatief nieuwe in situ techniek voor het saneren van vervuilde gronden is de zogenaamde fyto-remediatie: het gebruik van groene planten bij het verwijderen, immobiliseren of onschadelijk maken van milieuverontreinigingen in grond, sediment en afvalwater. Hieronder wordt ingegaan op de verschillende vormen van fyto-remediatie.

#### *Fyto-extractie en rhizofiltratie*

Bij fyto-extractie wordt de verontreiniging (b.v. zware metalen) daadwerkelijk door de plantenwortels opgenomen, meestal via de bodemoplossing. Na transport naar de bovengrondse delen van het gewas kunnen deze van het veld worden afgevoerd en verwerkt (verbranding, compostering), waarbij concentratie van de verontreiniging optreedt. Bij rhizofiltratie is er sprake van het gebruik van (water)planten in afvalwaterstromen. Bij deze techniek kan de gehele plant (inclusief wortels) worden geoogst.

#### *Rhizosfeer-bioremediëring en fytotransformatie*

Bij deze technieken wordt de biodegradatie (door bacteriën) van organische verontreinigingen in de bodem gestimuleerd onder invloed van het wortelstelsel van de planten (rhizosfeer-bioremediëring). Mogelijk is ook dat verbindingen in de plant zelf worden afgebroken (fytotransformatie).

#### *Fytostabilisatie*

Hierbij dragen planten bij aan het immobiliseren van de verontreiniging in de bodem, waardoor schadelijke milieueffecten worden voorkomen.

### Consequenties voor de schaal van het onderzoek

#### *Fyto-extractie*

Het opnameproces zelf vindt plaats op mm-cm niveau, op plant-fysiologisch niveau zou daarom kunnen worden volstaan met kolomproeven. Voor het beantwoorden van relevante vragen aangaande de toepassing en perspectieven van de techniek (b.v. het telen van een gewas om gehalten aan metalen enz. naar een aanvaardbaar niveau terug te brengen) moet een opschaling naar hectare en gewasniveau plaatsvinden. De benodigde gegevens voor deze opschaling zullen onder homogene omstandigheden op minimaal 1 - 3 m<sup>2</sup> niveau kunnen worden verzameld. Naarmate de variabiliteit van beworteling (variatiecoëfficiënt > 50 %!) en verontreiniging toeneemt, zal eveneens het benodigde aantal m<sup>2</sup> toenemen.

#### *Rhizosfeer-bioremediëring*

De schaal van de relevante processen bij rhizosfeer-bioremediëring ligt eveneens op mm-cm niveau. Indien experimenteel moet worden aangetoond dat biodegradatie sneller plaatsvindt in rhizosfeergrond ten opzichte van de bulkgrond dan moeten proeven worden uitgevoerd op kolomschaal. Overeenkomstig de situatie bij fyto-extractie zal bij onderzoeksvraagstellingen op gewasniveau minimaal 1 - 3 m<sup>2</sup> oppervlak, profiel 1 - 2 m diep moeten worden geteeld om een goede indruk in ruimte en tijd te verkrijgen van de overall effecten van beworteling op stofstromen, biobeschikbaarheid en biodegradatie.

## BIJLAGE C

### SINDERHOEVE, ALTERRA, TE RENKUM

Bezoek aan:  
ir. J. Drent  
Alterra  
Wageningen

De Sinderhoeve in Renkum is een proefbedrijf van Alterra te Wageningen. Het bedrijf beslaat een oppervlakte (in eigendom bij de Domeinen) van circa 10 ha op een zeer droogtegevoelige zandgrond ten noorden van Renkum. Het profiel bestaat ter plaatse uit een 20 - 30 cm laag humeuze zandgrond, hieronder bevindt zich een grindachtig profiel. Voor de watervoorziening is een gewas volledig afhankelijk van het humushoudende gedeelte van het profiel, aangezien het grondwater zich op een aanzienlijke diepte (> 10 m) bevindt. Capillaire opstijging vindt niet plaats. In het verleden heeft hier onder meer beregeningsonderzoek plaatsgevonden. Op dit moment is het onderzoek geconcentreerd in het proefslotencomplex ter plaatse. De grond van de boerderij wordt verder gebruikt als controlevelden van de NAK (Nederlandse Algemene Keuringsdienst).

#### **Aanwezige proefaccomodaties**

##### *Lysimeters*

Ten behoeve van het onderzoek naar de vochtvoorziening van gewassen (inmiddels afgebouwd) zijn in het verleden een 50-tal lysimeters aangelegd. Dit zijn betonnen compartimenten, geplaatst onder het maaiveld, aan weerszijden van een gang. De dimensies van een compartiment zijn 1,20 m (lengte) bij 1,40 m (breedte) bij 1,35 m of 1,65 m (diepte). Alle zijden van de compartimenten bestaan uit beton. In het verleden is een constructie aangebracht om een bepaalde grondwaterstand aan te houden en bovendien te registreren hoeveel vocht er wordt verbruikt of afgevoerd. De grond in de bakken was bovendien voorzien van een aantal keramische cups om bodemvocht te onttrekken en te analyseren op nutriënten.

30 lysimeters worden al een tiental jaren niet meer gebruikt en verkeren in een verwaarloosde toestand: voorzieningen voor de handhaving van de grondwaterstand zijn niet meer aanwezig, de bakken zelf vertonen scheuren. In feite is alleen de infrastructuur nog aanwezig (gang en compartimenten), een en ander is echter weer geschikt te maken voor onderzoek.

20 lysimeters zijn op dit moment in gebruik voor ecotoxicologische studies. Hiertoe zijn de bakken opnieuw bekleed (waterdicht gemaakt) en fungeren nu als microcosms.

##### *4 m-kolommen*

In een onderaardse kelder zijn 6 PVC-kolommen ( $\varnothing$  ca. 1 m, lengte 4 m) gesitueerd. In het verleden is hier onderzoek gedaan naar de uitspoeling van N en P onder invloed van bemesting en regenval. De diepte van het grondwater op de Sinderhoeve maakt dat deze faciliteit op deze plaats mogelijk was.

##### *Proefslotencomplex*

Op het zogenaamde *proefslotencomplex* vindt op dit moment het zwaartepunt van het onderzoek op de Sinderhoeve plaats. Proefsloten worden gebruikt voor het bepalen van de effecten van pesticiden (herbiciden, pesticiden) op het ecosysteem. Met effecten wordt bedoeld de effecten op de levensgemeenschappen in de sloot. Dit onderzoek vindt plaats ter verificatie van de uitkomsten van laboratoriumtoetsen, waarop het toelatingsbeleid van bestrijdingsmiddelen is

gebaseerd. Daarnaast worden de proefsloten gebruikt voor eutrofiëringsonderzoek: de sloten worden belast met verschillende hoeveelheden voedingsstoffen in relatie tot de normstelling voor de kwaliteit van het oppervlaktewater.

Er zijn twintig proefsloten aangelegd, elk 40 m lang, die met elkaar verbonden kunnen worden. De waterdiepte kan variëren tussen 0,25 en 0,75 m. De breedte aan de top van het sediment is 1,60 m, de breedte aan het wateroppervlak varieert tussen de 2,35 en 3,85 m. Het volume varieert tussen de 20 en 80 m<sup>3</sup>. Het bodemsediment in 16 sloten is lichte klei, 4 sloten hebben een meer zandige bodem. De sloten zijn volledig geïsoleerd van de omgeving door middel van folie. Een dubbele drainage dient als controle op deze isolatie. Toevoer en afvoer van water van de sloten wordt uitgevoerd met respectievelijk kantelbakken en pompen. De verblijftijd van water in de sloten is maximaal 7 dagen, er treden dus geen hoge stroomsnelheden op. Automatische waarnemingen: O<sub>2</sub>, pH en watertemperatuur, aan- en afvoer van water, neerslag, straling, luchttemperatuur, windsnelheid en windrichting. Voor meer informatie omtrent technische details (zie [Drent en Kersting, 1992]).

Er wordt samengewerkt met de vakgroep Aquatische Oecologie van Wageningen Universiteit.

#### *Gekozen dimensies van de proefsloten*

*Welke afwegingen zijn er gemaakt om de proefsloten een lengte van 40 m te geven?*

Gekozen is voor 40 m om dichterbij een natuurlijke situatie te komen. 80 m<sup>3</sup> slootinhoud komt meer met de natuurlijke toestand overeen dan 1 m<sup>3</sup>. Bij de laatste hoeveelheid heeft bijvoorbeeld bemonsteren een groot effect. Bemonsterde algen, watervlooien en macrofauna zouden in dat geval weer zorgvuldig moeten worden teruggeplaatst om het ecosysteem niet te verstoren.

*Waarom wordt er niet in het veld gemeten?*

Voor dit onderzoek geldt sterk dat er alleen betrouwbare metingen kunnen worden gedaan als de stoffen in kwestie kunstmatig worden aangebracht en de geschiedenis van de onderzoeksfaciliteit bekend is. Dit is onder praktijkomstandigheden moeilijk te realiseren vanwege niet-beheersbare invloeden van buitenaf en vanuit het verleden.

#### **Management van grote schaal faciliteit aspecten**

Door veranderende onderzoeksvragen is ook deze faciliteit gedeeltelijk niet benut, bijvoorbeeld door het wegvallen van vragen met betrekking tot de waterhuishouding van landbouwgewassen. Op dit moment wordt getracht de faciliteit (met name de lysimeters) te gebruiken voor vraagstukken met betrekking tot fytoremediatie. Hiertoe zijn al een 15-tal lysimeters gerenoveerd en geschikt gemaakt voor vragen met betrekking tot de opname van zware metalen door planten, enzovoorts. Ook een 30-tal kleinere 'aquaria' zijn gerenoveerd. Flexibiliteit van een grote schaal faciliteit lijkt noodzakelijk om veranderende onderzoeksvragen te kunnen blijven bedienen.



## BIJLAGE D

### OOSTWAARDHOEVE/EUROJOULE TE SLOOTDORP

Bezoek aan:

P. Goedbloed (IMAG, bedrijfsleider Oostwaardhoeve)

drs. R. Duijn (De Vries en Van de Wiel)

Op de Oostwaardhoeve, het proefbedrijf van IMAG (DLO-instituut voor Milieu- en Agritechniek), in Slootdorp loopt momenteel een grootschalig praktijkonderzoek naar 'extensieve biorestauratie van baggerspecie in combinatie met de teelt van wilgen'. Het onderzoek wordt geleid door Alterra en wordt onder andere gesteund door NOBIS, Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen Edam. Ook het bedrijf De Vries en Van de Wiel Milieutechniek BV te Schagen is bij het project betrokken. Gesproken is met de projectleider van EuroJoule (Peter Goedbloed, tevens bedrijfsleider van de Oostwaardhoeve) en met Rik Duin (De Vries en Van de Wiel).

In het samenwerkingsverband (EuroJoule genaamd) wordt gepoogd twee doelstellingen te combineren: duurzame energieproductie (door middel van biomassa) en het reinigen van waterbodems. Een vorm van dubbel landgebruik, waardoor beide doelstellingen sneller kunnen worden gerealiseerd omdat de grondkosten worden gedeeld.

#### **Uitvoering van het project**

Er wordt extensieve landfarming toegepast op een terrein van circa 10 ha. De te reinigen baggerspecie wordt in lagen van circa 50 cm dikte verspreid over het land. In het project ligt de nadruk op organische microverontreinigingen en in beperktere mate op zware metalen. Het op te brengen slib wordt geselecteerd: er is een bovengrens vastgesteld voor concentraties aan zware metalen. Dit mede omdat de kans bestaat dat na afloop van het project (na 10 jaar) het opgebrachte slib weer moet worden verwijderd. Aangenomen wordt dat door het telen van wilgen als energiegewas de afbraak van de verontreinigen wordt gestimuleerd, zodat na 10 jaar een schone bodem wordt opgeleverd. Daartoe worden vergelijkingen gemaakt tussen wel en geen wilgen telen en tussen wel en geen specie opbrengen.

EuroJoule vormt in feite een faciliteit waar verschillende onderzoeksprojecten kunnen worden uitgevoerd, zo is er een NOBIS-project (96-1-02) omtrent monitoring, verspreiding van olie en PAK's in horizontale en verticale richting (via metingen in drainwater, grond en baggerspecie). Dit project wordt op kleinere schaal uitgevoerd op een apart veld met subplots.

#### **Schaalaspecten**

Wat zijn de overwegingen geweest die de schaal bepaald hebben waarop het project wordt uitgevoerd? De volgende aspecten zijn van belang geweest bij de schaalgrootte:

##### *Bij het 10-ha proefveld*

- Gewaskeuze en bijbehorende mechanisatie, vooral voor de oogst van wilgen. De reeds ontwikkelde oogstmachines hebben afmetingen waarbij duidelijk wordt dat in hectares moet worden gedacht. Naast wilgen wordt ook in termen van natuurontwikkeling gedacht.
- Financiële aspecten. Hierbij zijn een tweetal items te noemen die direct verband houden met de uiteindelijk gekozen schaal:
  - a. de hoeveelheid baggerspecie die in het project kan worden verwerkt (de onderzoekskosten in het project worden bekostigd van het verschil dat verwerken van de specie op de gangbare manier zou kosten en de kosten van uitbrengen in dit project (= f 70/ton);

- b. kosten van wet- en regelgeving. Vereist was bovendien dat het project rondom met een hekwerk wordt afgesloten en dat een singel wordt aangelegd.

In het algemeen hebben bovengenoemde aspecten een schaalvergrotende werking gehad.

#### *Bij het NOBIS-proefveld*

De schaal van het NOBIS-proefveld is mede bepaald door de mate van aanvoer van baggerspecie. Er worden subplots aangelegd waar gemonsterde gaat worden. Hoe wordt met heterogeniteit (van de aangevoerde specie) omgegaan. Er wordt uitgegaan van een bepaalde praktijk NEN-norm: 10 boormonters, vervolgens mengen en analyse. Dit slaat dan op het bepalen van de uitgangs- en eindsituatie. Wellicht wordt voor het volgen van het verloop van het proces een andere strategie gevolgd. Ook zal waarschijnlijk intensiever in het begin dan aan het eind van het project worden bemonsterd.

#### **Management van grote schaal faciliteit**

Met EuroJoule kan als zodanig niet gesproken worden van een faciliteit die op dit moment ook voor andere gebruikers toegankelijk is. Het is wel een voorbeeld van een aanpak, waarbij onderzoek plaatsvindt op een schaal die het meest met de veldsituatie overeenkomt. De mogelijkheden van de De Oostwaardhoeve als DLO-proefboerderij kunnen ook in de toekomst voor het in situ saneringsonderzoek van belang zijn.

## BIJLAGE E

### WAGENINGEN RHIZOLAB, PLANT RESEARCH INTERNATIONAL

#### Inleiding

In een rhizotron kan in het algemeen de beworteling van gewassen visueel worden bestudeerd. Het Rhizolab van Plant Research International is eveneens een rhizotron-onderzoeksfaciliteit, maar verschilt van elders aanwezige rhizotrons doordat ruimer dan alleen naar wortels wordt gekeken. Bovendien kunnen niet alleen ondergrondse processen worden onderzocht, maar kan ook simultaan aandacht worden besteed aan bovengrondse processen.

#### Inrichting van het Rhizolab

Het Rhizolab bestaat uit 16 ondergrondse (lysimeter-achtige) compartimenten (2 m diep x 1,25 x 1,25) geconstrueerd rond een onderaardse gang. De compartimenten worden handmatig gevuld met grond, waarbij een keuze kan worden gemaakt met betrekking tot profielopbouw, bulkdichtheid, grondsoort, enzovoorts. In principe bestaat ook de mogelijkheid om de compartimenten met ongestoorde grondkolommen te vullen, hoewel de bemonsteringsmogelijkheden dan kleiner worden. Tijdens het vullen wordt het grondcompartiment voorzien van de volgende meetapparatuur:

- gaskamertjes, bodemlucht kan worden onttrokken en (semi)-automatische bepaling van O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en eventueel andere gasvormige componenten (koolwaterstoffen), hetzij ter plaatse hetzij via GC/MS op het laboratorium;
- keramische cups - bepaling van de waterpotentiaal;
- PEI-slangetjes - onttrekking van bodemvocht, waarin nutriënten, verontreinigingen, residuen, enzovoorts kunnen worden bepaald;
- capacitieve vochtsensoren - automatische registratie van vol.% vocht, tevens van temperatuur en geleidbaarheid;
- thermokoppels - ter bepaling van de temperatuur;
- minirhizotrons - horizontaal aangebrachte glazen buizen, waardoor bewortelingsintensiteit en de bewortelingsdynamiek kan worden gekwantificeerd.

Voor bovengenoemde samplers, sensors en waarnemingsapparatuur geldt dat zowel in horizontale als verticale richting wordt gemeten.

Bovengronds bestaat verder de mogelijkheid om een transparante overkapping over een gewas te plaatsen, apparatuur is aanwezig om (CO<sub>2</sub>) RV en temperatuur te regelen. Bovendien wordt gemeten de CO<sub>2</sub>-concentratie van de in- en uitgaande lucht. Bovengronds geeft dit een indruk van de groeisnelheid (fotosynthese) van het gewas. Ondergronds kan de bodemrespiratie worden gemeten.

Er bestaat de mogelijkheid om een grondwaterstand aan te brengen op elke hoogte. Natuurlijke regenval wordt voorkomen doordat automatisch een dak dichtschuift bij de eerste neerslag.

#### Onderzochte processen

- Ondergronds  
*Nutriënten- en wateropname in ruimte en tijd*  
In principe bestaat de mogelijkheid om een balans te maken voor met name stikstof en water. Het gebruik van N<sup>15</sup> (stabiel isotoop) als kunstmest geeft bovendien de mogelijkheid om onderscheid te maken tussen N afkomstig uit mineralisatie en uit de N-gift.

### *Bewortelingsdynamiek*

Eveneens in ruimte en tijd. Invloed van abiotische en biotische stress op beworteling. Relatie met nutriënten en wateropname. Turn-over van beworteling.

### *Phytoremediatie*

Invloed van beworteling op afbraak van organische contaminanten.

Invloed van beworteling/gewaskarakteristieken op opname van zware metalen

### *Biodegradatie*

In een NOBIS-project (97-1-06) wordt op dit moment onderzocht in hoeverre het Rhizolab geschikt is of gemaakt kan worden voor het in situ bodemsaneringsonderzoek. Voorlopige resultaten in dit project geven aan dat het transport van een verontreiniging met kerosine (3 liter) op deze schaal goed te volgen is mits voldoende samplers en sensoren in horizontale en verticale richting aanwezig zijn. Ook de biodegradatie van kerosine (aan de hand van gehalten aan CO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub> in de bodemlucht) bleek kwantitatief in ruimte en tijd te volgen.

## **Schaalaspecten**

In het gewaskundig onderzoek bestaat de keus veelal uit pot- en kolomproeven en veldproeven. Bij potproeven is de orde van grootte meestal 2 - 10 liter, soms 30 liter. Individuele experimentele eenheden in een veldproef beslaan over het algemeen een oppervlak van 10 tot 100 m<sup>2</sup> om tegemoet te komen aan de eisen die heterogeniteit in het veld stelt. Een belangrijke keuze voor de schaal in het Rhizolab werd bepaald door bewortelingsaspecten.

In een potproef is veelal geen sprake van een ongestoorde beworteling, omdat de potwanden beperkingen aan de groei oplegt. In het algemeen is de bewortelingsintensiteit en -diepte zeer heterogeen, vooral in het veld omdat daar plaatselijke verschillen in bodemstructuur en textuur hun werking uitoefenen. Doordat in het Rhizolab sprake is van een homogener situatie dan in het veld was het compromis een oppervlakte van circa 1,5 m<sup>2</sup> en een diepte van 2 m. Deze schaal maakt het mogelijk om niet alleen verschillen in de beworteling in verticale richting maar ook in horizontale richting te volgen. De oppervlakte is bovendien groot genoeg om te spreken van een semi-veldsituatie, mede doordat rond de compartimenten eenzelfde gewas wordt verbouwd. Hierdoor komt het microklimaat in het gewas vrij goed met het veld overeen. Gebleken is dat het op deze schaal mogelijk is balansen te maken voor bijvoorbeeld water- en stikstofopname.

Een praktische overweging was verder dat een grotere inhoud van een compartiment de praktische uitvoering van experimenten in de weg zou staan. Voor het vullen van 16 compartimenten moet jaarlijks al circa 50 m<sup>3</sup> grond worden verzet.

## **Management van grote schaal faciliteit**

Het Rhizolab is in 1990 gebouwd en heeft toen circa 1,3 Mfl gekost, additionele uitbreidingen en later aangekochte apparatuur bedragen ook enkele tonnen. In de loop der jaren is een duidelijker zicht gekomen op kostenposten en kostenstructuur van onderzoek in het Rhizolab. Dit heeft duidelijk repercussies gehad voor het onderzoek in deze faciliteit. De bouwkosten hebben eigenlijk een relatief geringe invloed op het onderzoek. Kosten voor beheer, onderhoud, energie, data-management bepalen een 'huurprijs' voor een compartiment (afhankelijk van al of niet klimatisering 7 - 15 kf per jaar), dit is exclusief de kosten voor chemische bepalingen, dataverwerking, enzovoorts (de eigenlijke onderzoekskosten).

Projecten in de beginperiode hadden veelal betrekking op nutriëntenbenutting in de akkerbouw en groenteteelt, de effecten van klimaatverandering en natuurontwikkeling. Op dit moment wordt het Rhizolab gebruikt voor fyto-remediatieonderzoek. Van een gewaarborgde continuïteit in het onderzoek is op dit moment echter geen sprake. De huidige tendens naar minder onderzoek op procesniveau (verdiepend fundamenteel onderzoek) maakt dat de capaciteit van het Rhizolab moeilijk volledig te benutten is.

BIJLAGE F

**INSTITUT FRANCO-ALLEMAND DE RECHERCHE SUR L'ENVIRONNEMENT**

Institut Franco-Allemand de Recherche sur l'Environnement

23 rue du Loess

BP 20

F-67037 Strasbourg Cedex

Tel.: (33) 3 88 10 67 96

Fax.: (33) 3 88 10 67 95

Contactpersonen:

M. Bettahar, P. Muntzer en G. Schäfer

## BIJLAGE G

### ARCADIS, LANDFARMING

Concept  
Bezoek aan:  
H. Winkel  
beheerder CUM-BAC-locatie Europoort  
Arcadis Heidemij  
d'Arcyweg  
Europoort

*Datum bezoek: 31 maart 1998*

#### **Inleiding**

Arcadis Heidemij heeft circa 10 jaar ervaring met landfarming van met olie verontreinigde grond. Op basis van deze ervaring en onderzoek van vakgroep FGBL aan de Universiteit van Amsterdam is het huidige CUM-BAC-concept ontwikkeld. Tevens is naar aanleiding van het onderzoek aan de Universiteit van Amsterdam een proefhal gebouwd op de locatie in Europoort om de resultaten van dit onderzoek met betrekking tot optimalisatie van landfarming te valideren. Hierna worden de beide systemen kort beschreven.

#### **CUM-BAC-systeem**

Het CUM-BAC-systeem wordt gebruikt voor de landfarming van met olie verontreinigde grond. Het systeem is in verschillende lagen van onder naar boven als volgt opgebouwd: Onderop wordt een impermeabele folie aangebracht. Daarboven wordt circa 70 cm drainagezand aangebracht met daarin een aantal drainagebuizen voor de afvoer van overtollig water. Bovenop de zandlaag wordt verontreinigde grond aangebracht met een maximale hoogte van circa 80 cm. Voor gronden waarin de olie minder goed afbreekt, wordt een kasconstructie via een railsysteem boven de verontreinigde grond aangebracht. Vanuit dit kassysteem kunnen water en nutriënten worden toegevoegd. De kasconstructie wordt ook gebruikt indien vluchtige componenten in de grond aanwezig zijn, zoals BTEX. De lucht met de damp wordt dan via een biofilter afgezogen.

In de zogenaamde open bakken is de gemiddelde verblijftijd circa 2 tot 3 maanden. In deze periode kan de olie in de grond tot circa 1.000 mg/kg (B-waarde) worden afgebroken en vervolgens als bouwstof worden hergebruikt. Indien deze concentraties niet gerealiseerd kunnen worden, gaat de verontreinigde grond naar de natte grondreiniging van Arcadis te Moerdijk of retour naar de proleembezitter.

De kasconstructie is 6,4 m breed en circa 100 m lang. De kas is in segmenten van 10,3 m in de lengte verdeeld. De bulkdichtheid van de grond is circa 1.400 kg/m<sup>3</sup>. De grond in één kas wordt in de regel 1 maal per week binnen 1 dag met een kraan omgezet. Dit heeft tot doel de grond van voldoende zuurstof te voorzien en de verontreiniging zoveel mogelijk te homogeniseren.

#### **Onderzoeksfaciliteit**

In de proefhal zijn 5 betonnen bakken opgesteld ( $h \times b \times l = 1,45 \times 5,15 \times 7 \text{ m}^3$ ). In de betonnen vloer zijn over de lengte 3 gleuven aangebracht waarin drains zijn aangebracht voor het verwijderen van overtollig water. In de betonnen vloer is een buizensysteem met warm water aangebracht om de grond te kunnen verwarmen. Tevens wordt een actieve beluchting toegepast via buizen die in de lengterichting in de grond worden ingegraven. De beluchting vindt plaats op 2 hoogten. Onderin

wordt lucht ingeblazen, terwijl bovenin de grond lucht wordt afgezogen. De afgezogen lucht wordt gereinigd met een compostfilter. Aan beide zijanten van elke bak is een sproei-installatie aangebracht voor de toediening van water en eventueel nutriënten. Elke bak wordt afgedekt met een zeil.

### **Verontreinigde grond**

In experimenten is gebruik gemaakt van met olie verontreinigde grond. De initiële concentratie olie bedroeg circa 20.000 mg/kg.

### **Experimenten**

Het doel van de experimenten in de proefhal was de verificatie van de vertaalslag van laboratorium-experimenten naar de schaal van de proefhal. In een eerste experiment bleken de afbraaksnelheden in de proefhal hoger te zijn dan in de laboratoriumexperimenten. Het vervolgonderzoek richtte zich met name op de meetmethoden in de proefhal. Met name debietmetingen en metingen aan CO<sub>2</sub> bleken kritisch voor het opstellen van massabalansen.

Metingen zijn verricht aan de CO<sub>2</sub>-productie, de temperatuur en het vochtgehalte. De metingen zijn on line verricht en per dag via een modem verzonden naar de afdeling R&D.

### **Resultaten in de proefhal**

Bij de experimenten in de proefhal bleek het respons-model van Freyer redelijk overeen te komen met de meetresultaten, hoewel de afbraaksnelheid in de proefhal nog steeds hoger bleek dan in de laboratoriumexperimenten. Naar de oorzaak hiervan wordt nog verder onderzoek verricht.

*24 juni 1998*

### **Management van grote schaal faciliteit**

De onderzoeksfaciliteit is door Arcadis uit eigen middelen gefinancierd. In de periode waarin de faciliteit niet wordt gebruikt voor onderzoek, wordt de installatie gebruikt voor de productie van schone grond. Dat de faciliteit niet continu wordt gebruikt voor onderzoek wordt ervaren als een natuurlijk gegeven. Wel is het van belang om van te voren in te schatten hoeveel proeven er minimaal uitgevoerd zullen gaan worden in een grootschalige faciliteit. Voor de uitvoering van projecten op grote schaal moet een deel van de kosten van de investering uit het project worden betaald. Tot nu toe zijn alleen experimenten door Arcadis zelf in deze faciliteit verricht. Men staat open voor samenwerking om met derden onderzoek in de faciliteit uit te voeren.



## BIJLAGE H

### GEODELFT

Bezoek aan:

ir. J.T. van der Poel  
drs. C.C.D.F van Ree  
drs. F.A. Weststrate  
Grondmechanica Delft

*Datum bezoek: 14 april 1998*

#### **Inleiding**

Grondmechanica Delft is één van vijf Grote Technologische Instituten (GTI) in Nederland en is gespecialiseerd in (milieu-)geotechnisch onderzoek. Voor dit type onderzoek wordt onder andere gebruik gemaakt van verschillende grootschalige onderzoeksfaciliteiten. Eén van deze faciliteiten is de geocentrifuge die gebouwd is voor onderzoek naar grondgedrag op grote diepten. De bouw van deze faciliteit is gestart ten behoeve van de bouw van de Oosterscheldedam. De faciliteit was eind 1989 gereed. De grootschalige faciliteiten bij Grondmechanica Delft kunnen in principe ook worden ingezet voor milieuonderzoek. De mogelijkheden van milieuonderzoek in de geocentrifuge worden in het kader van het Europese NECER-project op dit moment ontwikkeld. Een tweede grootschalige faciliteit is de grote modelbak.

#### **Onderzoeksfaciliteiten**

##### *Modelbak*

In de modelbak (1983) kunnen experimenten worden gedaan aan een specifieke zandfractie ten behoeve van de validatie van rekenmodellen voor civieltechnische onderzoeken. De afmetingen van de modelbak zijn:  $b \times l \times d = 2,5 \text{ m} \times 7,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ . De modelbak is vooral ontworpen om het mechanisch gedrag van zand te kunnen modelleren. De rekenmodellen, die hierbij worden gevalideerd, hebben een grondmechanisch karakter, zodat na validatie van de rekenmodellen met één specifieke grondsoort deze modellen kunnen worden gebruikt voor berekeningen in gronden met een andere samenstelling. Voor de validatie van de rekenmodellen is in de afgelopen 15 jaar een techniek ontwikkeld, waarbij het zand zodanig wordt geprepareerd dat een homogeen zandpakket wordt gevormd dat met water is verzadigd.

Bij het ontwerp van de modelbak zijn twee uitgangspunten gehanteerd. Ten eerste is nagegaan wat de vereiste schaal is waarop een bepaald onderzoek moet worden verricht. Ten tweede heeft men zich laten leiden door praktische randvoorwaarden bij het ontwerpen van de modelbak.

##### *Experimenten in de modelbak*

In de modelbak zijn tot nu toe verschillende sondeerapparaten onderzocht. Verder zijn temperatuurprofielen rond een leiding in de onverzadigde zone gemeten en zijn experimenten verricht in de modelbak met een horizontale grondwaterstroming. Voor dit laatste experiment is een verhang van de waterspiegel aangelegd van enkele centimeters over de lengte van de modelbak. Hiervoor is gewerkt met speciale filters om dit verhang te kunnen realiseren.

##### *Toekomstige experimenten in de modelbak*

Binnenkort zal de werking van in situ meetapparatuur in de modelbak worden getest voor een NOBIS-project.

### *Geocentrifuge*

De geocentrifuge biedt de mogelijkheid om experimenten uit te voeren waarbij door een vergroting van het zwaartekrachtveld de krachten op het model en de tijd worden verschaald. De centrifugekamer, waarin de geocentrifuge is opgesteld, heeft een diameter van 15 m. De armlengte is 6,5 m en er kan een maximale zwaartekrachtversnelling van 300 g worden bereikt. Hiermee kunnen met een klein model grote weglengten en krachten worden gesimuleerd, evenals lange perioden. De lengte verschaalt evenredig met de zwaartekrachtversnelling, evenals de krachten. Bij 100 g betekent dit bijvoorbeeld dat 1 m lengte van de modelkolom overeenkomt met 100 m. De krachten op 1 m diepte in het model komen dan overeen met 100 m in werkelijkheid. De tijd wordt verschaald in het kwadraat, zodat 1 dag bij 100 g overeenkomt met 10.000 dagen, ofwel circa 30 jaar.

De maximale modelmassa, inclusief de bak van de centrifuge, bedraagt 5,5 ton. Bij 300 g betekent dit 1.650 ton, hetgeen overeenkomt met het gewicht van 50 vrachtwagens. Naast een grote centrifuge is er ook een tafelcentrifuge beschikbaar voor inleidende experimenten.

### *Experimenten in de geocentrifuge*

In de kleine centrifuge zijn experimenten uitgevoerd aan het onverzadigde transport van de verontreiniging, waarbij doorbraaksnelheden van de verontreiniging gemeten zijn in grondkolommen. Met verontreinigd slib zijn consolidatieproeven uitgevoerd, waarbij de samenstelling van het uittredende water is bepaald en is nagegaan in hoeverre het slib een slecht doorlatende filterlaag op het scheidingsvlak met de ondergrond vormt.

In de experimenten met de grote geocentrifuge in het NECER-programma wordt aandacht besteed aan het DNAPL-transport van gechlorideerde koolwaterstoffen en de adsorptie- en desorptiekinetiek.

### **Management van grote schaal faciliteit**

De onderzoeksfaciliteit is gefinancierd vanuit speurwerk gelden. Daarnaast zijn vooraf gesprekken gevoerd met potentiële financiers van onderzoeksprojecten. Deze partijen zijn ook betrokken bij het plannen van onderzoek. Er zijn geen financiële garanties afgegeven aan GeoDelft, zodat de exploitatie van de grote schaal faciliteit een ondernemersrisico inhoudt. In de beginperiode was de bezetting van de faciliteit voor milieuonderzoek laag. Dit werd vooral veroorzaakt door onbekendheid van probleembezitters met de mogelijkheden van de onderzoeksfaciliteit. Door contacten te leggen met onder andere de Technische Universiteit Delft wordt geprobeerd om een groter publiek bekend te maken met de mogelijkheden van de faciliteit.

De faciliteit staat open voor gebruik door derden, bij voorkeur in samenwerking met GeoDelft. De herkenbaarheid van de grote schaal faciliteiten kan onder andere worden vergroot door programmeringsoverleg van de operationele grote schaal faciliteiten op het gebied van bodemsanering in Nederland. Hiermee zou ook de continuïteit van het onderzoek kunnen worden verhoogd.

## BIJLAGE I

### VRIJE UNIVERSITEIT AMSTERDAM

Inventarisatie van grootschalige onderzoekfaciliteiten met betrekking tot bodemonderzoek in Nederland

Bezoek aan:  
dr.ir. C.A.M. van Gestel  
vakgroep Dieroecologie  
faculteit der biologie  
Vrije Universiteit  
De Boelelaan 1087  
Amsterdam

*Datum bezoek: 30 maart 1998*

#### **Inleiding**

Bij de vakgroep Dieroecologie (VU) is sinds 1994 onderzoek verricht aan het project 'Validatie van toxiciteitsgegevens' in samenwerking met TNO en RIVM in opdracht van het Ministerie van VROM.

De aanleiding voor dit project is dat de normstelling voor verontreinigde bodems onder andere is gebaseerd op ecotoxiciteitstoetsen. Deze toetsen worden meestal in het laboratorium uitgevoerd met een aantal toetsdieren die worden blootgesteld aan verschillende concentraties van de te onderzoeken stof. De prestaties van deze dieren worden vervolgens vergeleken met die van een controlegroep. Resultaten van dergelijke proeven worden gebruikt bij het opstellen van het Nederlandse normstellingsbeleid.

Een veel uitgevoerde toets is een door ISO gestandaardiseerde laboratorium ecotoxiciteitstoets met de springstaart *Folsomia candida*.

Het onderzoek bij de vakgroep Dieroecologie richtte zich op de vraag of de gemeten effecten in de laboratoriumtoets een goede indicatie geven voor effecten in het veld. Om deze vraag te kunnen beantwoorden is onder andere een proefveld aangelegd op de campus van de VU.

#### **Onderzoeksfaciliteit**

Het proefveld op de campus van de VU bestaat uit zes identieke veldjes van 5 x 1 m<sup>2</sup> met een diepte van 1 m. Elk veld is in 10 vakken verdeeld van 0,5 x 1 m<sup>2</sup> met behulp van roestvrijstalen (RVS) platen. De RVS-platen staken circa 25 cm boven het maaiveld uit. In elke bak is eerst zand aangebracht met een drainagesysteem. Aan de onderkant van de vakken is een vloei-stofdichte folie aangebracht. Het drainagewater werd opgevangen in een basin en geanalyseerd op de verontreiniging voordat dit geloosd werd op het riool.

#### **Verontreinigde grond**

Bovenop het drainagezand werd circa 25 cm grond (Panheel grond) aangebracht. Deze grond komt qua samenstelling overeen met grond uit Budel, alwaar de grond vervuild is met zware metalen, waaronder zink. De Panheel grond is kunstmatig verontreinigd met een ZnCl<sub>2</sub>-oplossing in verschillende concentraties. Hierbij is geprobeerd om per vak een homogene verontreiniging aan te brengen door de grond tijdens het verontreinigen te mengen in een betonmolen. Elk van

de 10 vakken bevatte een verschillende concentratie, zodat er een concentratierange werd verkregen.

## **Experimenten**

De ISO-laboratoriumtoets met *Folsomia candida* is zowel in het laboratorium uitgevoerd als in het proefveld. Hierbij werd gebruik gemaakt van cilinders met een diameter van 5 cm en een hoogte van circa 5 cm. De cilinders werden gevuld met grond uit het proefvak en vervolgens gedurende maximaal 12 weken in het proefvak geplaatst. De onder- en bovenkant van de cilinders werden met gaas afgesloten, zodat het contact met bodemvocht in stand bleef en de springstaarten de cilinder niet konden verlaten.

## **Resultaten van het proefveld**

De eerste regenval na de aanleg van het proefveld veroorzaakte een snelle daling van de zinkconcentraties in de bodem. Na enkele maanden ontstond een stabiele verontreiniging die min of meer vergelijkbaar was met de verontreiniging in Budel. De effecten van zink onder de proefveldomstandigheden op de gebruikte springstaarten bleek vergelijkbaar met de resultaten van de laboratoriumproeven die met dezelfde grond werden uitgevoerd.

De temperatuur bleek de meest bepalende parameter te zijn bij de vergelijking van de laboratoriumtoets met het proefveld. De laboratoriumtoets wordt bij circa 20 °C uitgevoerd, terwijl de metingen in het proefveld bij lagere temperaturen worden uitgevoerd. De toetsduur neemt daarom via het fysiologische principe (bij 10 °C temperatuuurdaling tweemaal langere duur van het experiment) in het proefveld toe van 6 tot 12 weken.

## **Overige resultaten**

Verder bleek uit het overige onderzoek naar met zink verontreinigde grond dat de verschillen in biologische beschikbaarheid van zink tussen in het laboratorium vervuilde grond en de werkelijke verontreinigde grond van doorslaggevend belang zijn bij de vertaling van laboratoriumresultaten naar de werkelijke veldsituatie (Budel).

## **Vervolgonderzoek**

Om te kunnen onderzoeken welk effect een zinkverontreiniging heeft op een levensgemeenschap die bijvoorbeeld bestaat uit springstaarten, regenwormen en planten is onderzoek op een grotere schaal nodig.

Dergelijk onderzoek zal op korte termijn uitgevoerd gaan worden in het NOW-programma 'Systeemgericht ecotoxiciteitsonderzoek'. Dit programma, met een omvang van circa f 10 miljoen, wordt ondersteund door de Ministeries van LNV, V&W, OCW en VROM. Het onderzoek zal voor een groot deel worden uitgevoerd via zogenaamde 'gebonden middelen'.

Op dit moment is nog onduidelijk of het onderzoek direct in het veld zal worden uitgevoerd of dat er gebruik zal worden gemaakt van een speciale grootschalige onderzoeksfaciliteit.

## **Literatuur**

Smit, E., 1997.

Field relevance of the *Folsomia candida* soil toxicity test.

Thesis Vrije Universiteit (ISBN 90-9010814-9).

*30 maart 1998*

### **Management van grote schaal faciliteit**

De investering van de faciliteit bij de VU is gefinancierd binnen één project. Aan het einde hiervan is er enige tijd geen onderzoek in verricht. In 1999 is er een vervolgproject gestart door een andere vakgroep. De omvang van de locatie is relatief gering en staat niet open voor het verrichten van onderzoek door derden. Wel staat men open voor samenwerking.